

3. RFC 6550 : RPL : IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks

RFC 6550 : 低功耗和有損網路協定 : IPv6 低功耗和有損網路路由協定

網際網路工程任務組(IETF)

Request for Comments : 6550

分類 : 標準

ISSN : 2070-1721

T. Winter, Ed.

P. Thubert, Ed.

Cisco Systems

A. Brandt

Sigma Designs

J. Hui

Arch Rock Corporation

R. Kelsey

Ember Corporation

P. Levis

Stanford University

K. Pister

Dust Networks

R. Struik

Struik Security Consultancy

JP. Vasseur

Cisco Systems

R. Alexander

Cooper Power Systems

2012 年 3 月

低功耗和有損網路協定 : IPv6 低功耗和有損網路路由協定

摘要

低功耗和有損網路(LLN)是一種路由及互連都受到約束的網路。LLN 路由器通常在處理能力, 記憶體和能量(電池電量)端面受到限制。它們的互連具有高損耗率, 低數據速率和不穩定性的特點。LLNs 由幾十個到幾千個路由器組成。支援包括點對點(在 LLN 的內部設備之間), 點對多點(從中央控制點到 LLN 內部的子設備), 以及多點對點(由 LLN 內部設備到一個中央控制點)的通信流。本文件詳述 IPv6 低功耗和有損網路路由協定(RPL), 它提供由 LLN

內部設備到中央控制點的多點對點流量，以及支援由中央控制點到 LLN 內部設備的點對多點流量的機制。也提供點對點流量的支援。

本文的狀態

這是一份網路標準追蹤的文件。

此文件為網路工程任務組(IETF)的產品。它代表 IETF 團體的共識。它已經受到公開的審核，也由網路工程指導小組批准發布。有關網路標準的更多資訊，請參見 RFC5741 的第 2 節。

更多有關此文件現行狀態的資訊、任何勘誤表，以及如何回饋意見，都可以到 <http://www.rfc-editor.org/info/rfc6550>。

著作權聲明

著作權© 2012 IETF 信託機構以及被確認為文件作者的所有人。
版權所有。

本文件受 BCP 78 和 IETF 信託關於 IETF 文件的法律條款 (<http://trustee.ietf.org/license-info>) 的約束，在本文件發布之日生效。請仔細閱讀這些文件，因為它們描述您對本文件的權利和限制。編碼從本文件中提取的組件必須包含「信託法律條款」第 4.e 節所述的簡化「BSD」許可證文本，並且不提供「簡化『BSD』許可證」中所述的保證。

目錄

1.	前言	8
1.1.	設計原理	8
1.2.	期望的鏈結層類型	10
2.	術語	10
3.	協定綜述	13
3.1.	拓撲	13
3.1.1.	建造拓撲	13
3.1.2.	RPL 識別符	14
3.1.3.	實例、DODAG 和 DODAG 版本	15

3.2.	上行路由和DODAG的結構	16
3.2.1.	目標函數(OF)	17
3.2.2.	DODAG修復.....	17
3.2.3.	安全	17
3.2.4.	接地的DODAG和浮動的DODAG	18
3.2.5.	本地的DODAGs	18
3.2.6.	管理偏好	18
3.2.7.	資料路徑驗證和循環檢測	18
3.2.8.	分散式演算法運算	19
3.3.	下行路由和目的地廣告	19
3.4.	本地的DODAGs路由發現.....	20
3.5.	秩數屬性	20
3.5.1.	秩數比較(DAGRank()).....	21
3.5.2.	秩數關係	22
3.6.	路由度量和RPL的使用限制	23
3.7.	循環避免	24
3.7.1.	貪婪和不穩定	24
3.7.2.	DODAG 循環.....	26
3.7.3.	DAO循環	27
4.	RPL支援的通信流	27
4.1.	多點對點流量	27
4.2.	點對多點流量	27
4.3.	點對點流量	27
5.	RPL實例	28
5.1.	RPLInstanceID	29
6.	ICMPv6 RPL控制訊息.....	30
6.1.	RPL安全欄位.....	32
6.2.	DODAG資訊請求(DIS)	36
6.2.1.	DIS基本物件格式.....	36
6.2.2.	安全DIS.....	37
6.2.3.	DIS選項.....	37
6.3.	DODAG資訊物件(DIO).....	37
6.3.1.	DIO基本物件格式	37
6.3.2.	安全的DIO	39
6.3.3.	DIO選項	39
6.4.	目的地廣告物件(DAO)	40

6.4.1.	DAO基本物件格式	40
6.4.2.	安全DAO	41
6.4.3.	DAO選項	41
6.5.	目的地廣告物件確認(DAO-ACK).....	42
6.5.1.	DAO-ACK基本物件格式.....	42
6.5.2.	安全DAO-ACK.....	43
6.5.3.	DAO-ACK選項.....	43
6.6.	一致性檢驗(CC).....	43
6.6.1.	CC基本物件格式.....	43
6.6.2.	CC選項.....	45
6.7.	RPL控制訊息選項	45
6.7.1.	RPL控制訊息選項通用格式.....	45
6.7.2.	填充1	46
6.7.3.	填充N	46
6.7.4.	DAG度量容器	47
6.7.5.	路由資訊	47
6.7.6.	DODAG配置.....	49
6.7.7.	RPL目標.....	51
6.7.8.	傳輸資訊	52
6.7.9.	請求資訊	55
6.7.10.	前綴資訊	57
6.7.11.	RPL目標描述符.....	60
7.	順序計數器	60
7.1.	順序計數器綜述.....	61
7.2.	順序計數器操作.....	62
8.	上行路由	63
8.1.	DIO基本規則.....	64
8.2.	上行路由的發現和維護.....	64
8.2.1.	DODAG版本中的鄰居和父節點	65
8.2.2.	跨DODAG版本的鄰居和父節點	66
8.2.3.	DIO訊息通信	71
8.3.	DIO傳輸	71
8.3.1.	涓流參數	72
8.4.	DODAG選擇	73
8.5.	作為葉節點的操作	73
8.6.	行政管理秩數.....	74

9.	下行路由	74
9.1.	目的地廣告父母	75
9.2.	下行路由發現和維護	75
9.2.1.	路徑順序的維護	76
9.2.2.	DAO訊息的產生	77
9.3.	DAO基本規則	77
9.4.	DAO訊息的結構	78
9.5.	DAO傳輸調度	80
9.6.	觸發DAO訊息	81
9.7.	非儲存模式	82
9.8.	儲存模式	83
9.9.	路徑控制	83
9.9.1.	路徑控制示例	85
9.10.	多播目的地廣告訊息	87
10.	安全機制	88
10.1.	安全概述	88
10.2.	加入安全網路	89
10.3.	安裝密鑰	90
10.4.	一致性檢查	91
10.5.	計數器	91
10.6.	傳出封包的傳輸	92
10.7.	接收傳入封包	93
10.7.1.	時間戳密鑰檢查	95
10.8.	覆蓋完整性和保密性	95
10.9.	密碼操作模式	96
10.9.1.	CCM Nonce	96
10.9.2.	簽名	97
11.	封包轉發和循環避免/檢測	97
11.1.	封包轉發的建議	97
11.2.	循環避免和檢測	99
11.2.1.	源節點操作	99
11.2.2.	路由器操作	100
12.	多播操作	102
13.	路由鄰接的維護	103
14.	目標函數準則	104
14.1.	目標函數行為	104

15.	與鄰居發現互操作的建議.....	106
16.	可互操作實施要求摘要.....	107
16.1.	共同要求.....	107
16.2.	作為RPL葉節點運行(僅限).....	108
16.3.	作為RPL路由器運行.....	108
16.3.1.	支援上行路由(僅限).....	108
16.3.2.	在非儲存模式下支援上行路由和下行路由.....	108
16.3.3.	儲存模式下支援上行路由和下行路由.....	109
16.4.	未來規範的項目.....	110
17.	RPL常量和變數.....	110
18.	可管理性考慮因素.....	112
18.1.	介紹.....	112
18.2.	配置管理.....	113
18.2.1.	初始化模式.....	113
18.2.2.	DIO和DAO基本訊息和選項配置.....	114
18.2.3.	LLN中每個路由器上配置的協定參數.....	114
18.2.4.	在LLN中的每個非DODAG根路由器上配置的協 定參數	115
18.2.5.	要在DODAG根上配置的參數.....	116
18.2.6.	與基於DAO的機制相關的RPL參數的配置.....	117
18.2.7.	與安全機制相關的RPL參數的配置.....	117
18.2.8.	預設值.....	118
18.3.	監控RPL運作.....	118
18.3.1.	監視DODAG參數.....	119
18.3.2.	監控DODAG不一致和循環檢測.....	119
18.4.	監控RPL資料結構.....	120
18.4.1.	候選鄰居資料結構.....	120
18.4.2.	面向目的地的有向無循環圖(DODAG)表.....	120
18.4.3.	路由表和DAO路由項目.....	121
18.5.	故障管理.....	122
18.6.	策略.....	123
18.7.	故障隔離.....	124
18.8.	對其他協定的影響.....	124
18.9.	績效管理.....	124
18.10.	診斷.....	125
19.	安全考慮因素.....	125

19.1.	綜述	125
20.	IANA注意事項	127
20.1.	RPL控制訊息	127
20.2.	RPL控制編碼的新註冊表	127
20.3.	新的操作模式登記處(MOP)	128
20.4.	RPL控制訊息選項	129
20.5.	物件編碼點(OCP)註冊表	130
20.6.	安全區段算法的新註冊表	130
20.7.	安全區段旗標的新註冊表	131
20.8.	每個KIM安全級別的新註冊表	131
20.9.	DODAG資訊請求(DIS)旗標的新註冊表	133
20.10.	DODAG資訊物件(DIO)旗標的新註冊表	133
20.11.	目的地廣告物件(DAO)旗標的新註冊表	133
20.12.	目的地廣告物件(DAO)確認旗標的新註冊表	134
20.13.	新一致性檢查(CC)旗標註冊表	135
20.14.	DODAG配置選項旗標的新註冊表	135
20.15.	RPL目標選項旗標的新註冊表	136
20.16.	新的傳輸資訊選項旗標註冊表	136
20.17.	請求資訊選項旗標的新註冊表	137
20.18.	ICMPv6：源路由標頭中的錯誤	137
20.19.	鏈結本地範圍組播位址	138
21.	致謝	138
22.	貢獻者	139
23.	參考文獻	139
23.1.	規範性參考文獻	139
23.2.	資訊參考	140
附錄A.	示例操作	143
A.1.	使用節點擁有的前綴儲存模式的示例操作	143
A.1.1.	DIO訊息和PIO	144
A.1.2.	DAO訊息	145
A.1.3.	路由資訊庫	145
A.2.	使用子網寬前綴儲存模式的示例操作	146
A.2.1.	DIO訊息和PIO	147
A.2.2.	DAO訊息	148
A.3.	具有節點擁有的前綴的非儲存模式下的示例操作	148
A.3.1.	DIO訊息和PIO	149

A.3.2.DAO訊息	149
A.3.3.路由資訊庫	150
A.4. 具有子網寬前綴的非儲存模式下的示例操作	150
A.4.1.DIO訊息和PIO.....	151
A.4.2. DAO訊息	152
A.4.3. 路由資訊庫	152
A.5.帶外部前綴的示例	153

1. 前言

低功耗和有損網路(LLN)由大量受限節點(這種節點在處理能力、記憶體，以及有時在電池供電或能量清除時，能量也會受到限制)組成。這些路由器通過有損鏈結互連，通常僅支援低數據速率，通常在封包傳輸相對較低時會不穩定。這種網路的另一個特徵是流量模式不是簡單的點對點，反而通常是點對多點或多點對點。此外，這樣的網路可能包含多達數千個節點。這些特點為路由解決端案提供獨特的挑戰：網路工程任務組的 POLL 工作組在[RFC5867]、[RFC5826]、[RFC5673]和[RFC5548]，為低功耗和有損網路(LLN)路由協定定義特定的路由應用要求。

本文件規定 IPv6 的低功耗和有損網路路由協定(RPL)。請注意，儘管 RPL 是根據上述文件中的要求制定，但其用途不得限於這些應用。

1.1. 設計原理

RPL 是依 [RFC5867]、[RFC5826]、[RFC5673]，以及[RFC5548] 文件中的要求所設計的。

網路可以同時運行多個 RPL 實例。每個這樣的實例可以服務於不同，以及潛在的不相容約束或性能標準。本文件定義單個實例的運行端式。

為了能在廣泛的 LLN 應用欄位中運用，RPL 將封包處理和轉發從路由優化目標中分離出去。這些目標的例子包括最小化能量、延遲或滿足約束。本文件描述 RPL 的運作模式。其他配套文件規定

路由目標函數。RPL 實現，以支援特定的 LLN 應用程式，將根據應用要求包括必要的目標函數。

RPL 操作需要雙向連接。在一些 LLN 環境中，這些連接可能表現出不對稱的屬性。必需在路由器被用作父之前驗證路由器的可達性。RPL 期望能在選擇父階段觸發外部機制，以驗證連接屬性和相鄰的可達性。鄰居不可達檢測(NUD)是這樣的一種機制，但其是可替代的，包括雙向轉發偵測(BFD)[RFC5881]以及來自較低層，例如通過第 2 層(L2)提示的觸發器，如[RFC5184]。一般而言，為了最小化監控未使用的連接成本，更看重對流量有反應的檢測機制。

RPL 也期望在封包中由外部機制存取和傳輸一些控制資訊，稱為「RPL 封包資訊」。RPL 封包資訊在第 11.2 節中定義，並能夠關聯資料封包與 RPL 實例和 RPL 路由狀態的驗證。RPL 選項[RFC6553]是一這類機制的例子。所有封包都需要該機制，除了使用嚴格的源路由(用於在第 9 節中詳細介紹的非儲存模式下行路由)以外，可以防止無限循環並減少對 RPL 的封包資訊需求。未來的配套規範可能會提出在 IPv6 中攜帶 RPL 封包資訊的替代端法，並可以擴充 RPL 封包資訊以支援附加功能。

RPL 提供一種機制在動態形成的網路拓撲上傳播資訊。這種傳播機制使得節點中的配置能夠最小化，節點能夠盡可能地自動運行。這種機制使用涓流[RFC6206]來優化傳播，如第 8.3 節所述。

在一些應用程式中，RPL 匯集擁有獨立前綴路由器的拓撲結構。這些前綴是否可聚合取決於路由器的來源。擁有前綴的路由器被廣告為 on-link 的形式。

RPL 還引入將公共前綴綁定在子網內進行路由的功能。一個來源可以注入有關 RPL 要傳播的子網的資訊，該來源對該子網具有權威性。因為很多 LLN 鏈結都有非傳遞屬性，因此 RPL 在子網內傳播公共前綴時不得廣告為 on-link 形式。

特別是 RPL 可以傳播 IPv6 鄰居發現(ND)[RFC4861]前綴資訊選項(PIO)和[RFC4191]路由資訊選項(RIO)。ND 資訊由 RPL 傳播到主機，保留路由器的所有原始語義，而路由器到路由器的擴充有限，

儘管如此它也不會與路由廣告混淆，永遠不會直接在另一個路由協定中分配。RPL 節點通常結合主機和路由器的行為。作為主機，它將處理[RFC4191]、[RFC4861]、[RFC4862]和[RFC6275]中規定的選項；作為路由器，RPL 節點可以廣告特定鏈結所需的選項資訊，例如，在 ND 路由器廣告(RA)訊息，但確切的操作超出範圍。

本規範的一組配套文件將提供以適用性聲明的形式為一系列應用場景的操作要點提供進一步指導，包括建築物自動化、家庭自動化、工業和城市應用場景。

1.2. 期望的鏈結層類型

根據 IP 的分層架構，RPL 不依賴特定鏈結層技術的任何特定功能。RPL 旨在能夠在各種不同類型的鏈結層，包括資源受限和潛在有損，或通常與高度受限的主機或路由器設備，但不限於低功率無線或 PLC(電力線通信)技術。

在設計 RPL 和具體鏈結層技術間的鏈結層介面時，實施者可參考[RFC3819]以獲得助益。

2. 術語

本文件中的"必須(MUST)"、"不得(MUST NOT)"、"必要(REQUIRED)"、"必須(SHALL)"、"不得(SHALL NOT)"、"應該(SHALL NOT)"、"不應該(SHOULD NOT)"、"建議(RECOMMENDED)"、"不建議(NOT RECOMMENDED)"、"可以(MAY)"以及"可選(OPTIONAL)"將按 RFC2119[RFC2119]中的描述進行解釋。

此外，本文件使用[ROLL-TERMS]中的術語和介紹以下術語：

DAG：有向無循環圖。具有該屬性的有向圖，所有的邊都以非循環的端式定向。所有邊都包含在朝向或終止於一個或多個根節點的路徑。

DAG 根：DAG 根是 DAG 中無外向邊的節點。因為根據定義，圖表是非循環的，所有 DAG 必須至少有一個 DAG 根，且所有路徑終止於 DAG 根。

目標導向的 DAG(DODAG)：以單個目的地為根的 DAG，也就是沒有外向邊的單個 DAG 根(DODAG 根)。

DODAG 根：DODAG 根是 DODAG 的 DAG 根。DODAG 根可以充當 DODAG 的邊界路由器。特別是，它可以聚合 DODAG 中的路由，且可重新分配 DODAG 路由到其他路由協定。

虛擬 DODAG 根：虛擬 DODAG 根是兩個或更多 RPL 路由器的結果，例如，IPv6 低功率無線個人區域網路邊界路由器(6LBRs)，通過協調 DODAG 狀態同步並一致行動，對於 LLN，它像是單個(具有多個介面)的 DODAG 根。此種協調最有可能發生在可靠傳輸鏈結上的受電設備之間，其設計細節超出本規範的範圍(將在未來的配套規範中定義)。

向上：向上是指從葉節點到 DODAG 根的端向，跟隨 DODAG 邊緣。其遵循用於圖形和深度優先搜尋的通用術語，其中頂點離根更遠時是「更深」或「向下」；頂點離根更接近時是「更淺」或「向上」。

向下：向下指從 DODAG 根向葉的端向節點，與 DODAG 的邊相反。其遵循用於圖形和深度優先搜尋的通用術語，其中頂點離根更遠時是「更深」或「向下」；頂點離根更接近時是「更淺」或「向上」。

秩數：節點秩數定義 DODAG 根節點和其他節點的相對位置。秩數在向下端向嚴格增加並且嚴格減少向上的端向。計算秩數的確切端式取決於 DAG 的目標函數(OF)。秩數可以類似跟蹤簡單的拓撲距離，可以作為函數計算鏈結指標，且可能會考慮如限制等其他的屬性。

目標函數(OF)：OF 定義路由度量、優化目標和相關功能，皆用於計算秩數。此外，OF 決定如何選擇 DODAG 的父節點，進而決定 DODAG 的形成。

目標碼點(OCP)：OCP 是一識別符，表示 DODAG 使用的目標函數。

RPLInstanceID：RPLInstanceID 是網路內的唯一識別符。具有相同 RPLInstanceID 的 DODAG 共享相同目標函數。

RPL 實例：RPL 實例是一個或多個 DODAG 共享 RPLInstanceID 的組合。一個 RPL 節點最多屬於一個 RPL 實例中的 DODAG。每個 RPL 實例的運行皆獨立於其他 RPL 實例。本文件描述單個 RPL 實例內的操作。

DODAGID：DODAGID 是 DODAG 根的識別符。DODAGID 在 LLN 中的 RPL 實例範圍內是唯一的。該元組 (RPLInstanceID, DODAGID) 唯一標識一個 DODAG。

DODAG 版本：DODAG 版本是特定給定 DODAGID 的 DODAG 的具體迭代(「版本」)。

DODAG 版本號：DODAG 版本號是一個順序計數器，由根開始增加，以形成新版本的 DODAG。一個 DODAG 版本由 (RPLInstanceID, DODAGID, DODAG 版本號) 元組唯一標示。

目標：目標是一個被定義於 RPL 範圍之外的應用程序特定目標。任何以 DODAG 為根的節點都需要知道這個目標，以決定是否可以滿足該目標。一個典型的目標是根據具體的目標函數構建 DODAG，以保持與一組主機的連結(例如，使用可最小化度量的目標函數，並連接到特定的資料庫主機以儲存收集的資料)。

接地的：當 DODAG 根滿足目標時，則此 DODAG 為接地的。

浮動的：如果 DODAG 未接地，則它是浮動的。一個漂浮的 DODAG 不被要求具備滿足目標所需的屬性。然而，它可以提供 DODAG 中到其他節點的連接能力。

Sub-DODAG：節點的 Sub-DODAG 是通過 DODAG 根節點路徑的其他節點集合。Sub-DODAG 中的節點具有比該節點更大的秩數。(參見第 3.5.1 節)。

本地 DODAG：本地 DODAG 包含一個也僅有一個根節點，且它們允許單個根節點去分配和管理 RPL 實例，由本地 RPLInstanceID 標識不需與其他節點協調。通常，這是為了優化在 LLN 中到目的地的路由。(參見第 5 節)。

全域 DODAG：全域 DODAG 使用可能的全域 RPLInstanceID，以在其他幾個節點之間做協調。(參見第 5 節)。

DIO：DODAG 資訊物件(參見第 6.3 節)

DAO：目的地廣告物件(參見第 6.4 節)

DIS：DODAG 信息請求(參見第 6.2 節)

CC：一致性檢驗(參見第 6.6 節)

當它們形成網路時，相對於傳統 IP 網路，LLN 設備經常混合主機和路由器的角色。在此文件中，「主機」是指可以生成但不轉發 RPL 流量的 LLN 設備；「路由器」是指可以轉發以及產生 RPL 流量的 LLN 設備；而「節點」指的是所有 RPL 設備、主機或路由器。

3. 協定綜述

本節的目的是本著[RFC4101]中的精神描述 RPL。協定詳細資訊可在其他章節中找到。

3.1. 拓撲

本節介紹可能形成的基本 RPL 拓撲，以及構建這些拓撲結構的規則，即規定管理 DODAG 形成的規則。

3.1.1. 建造拓撲

LLNs，如無線電網路，通常不具有預定的拓撲結構，例如由點對點導線強制形成的拓撲結構，因此 RPL 必須發現鏈結，然後有節制地選擇同級。

在許多情況下，因為第 2 層範圍僅部分重疊，所以 RPL 形成非傳遞/非廣播多重存取(NBMA)網路拓撲，並在此基礎上計算路由。

RPL 路由優化一個或多個被當作拓撲接收點的根與根之間發送或接收的流量。因此，RPL 組織一個被分為一個或多個目標導向 DAGs(DODAGs)的有向無循環圖(DAG)作為拓撲結構，每個接收器皆有一個 DODAG。如果 DAG 有多個根，則可以預期這些根是由公共骨幹網聯合，例如傳輸連結。

3.1.2. RPL 識別符

RPL 使用四個值來標識和維護拓撲結構：

- 第一個是 RPLInstanceID。RPLInstanceID 標識一組一個或多個目標導向的 DAG(DODAGs)。一個網路可以有許多個 RPLInstanceID，每個都被定義為獨立的一組 DODAG，可以針對不同的目標函數(OFs)和/或應用程序進行優化。通過 RPLInstanceID 標識的一組 DODAG 稱為 RPL 實例。所有的 DODAG 都在相同的 RPL 實例中使用相同的 OF。
- 第二個是 DODAGID。DODAGID 的使用範圍在 RPL 實例內。在網路中 RPLInstanceID 和 DODAGID 的組合唯一識別一個 DODAG。一個 RPL 實例可能有多個 DODAG，每個都有一個唯一的 DODAGID。
- 第三個是 DODAG 版本號。DODAG 版本號的使用範圍在一個 DODAG 內。DODAG 有時會從 DODAG 根開始重建，並遞增其 DODAG 版本號。該 RPLInstanceID、DODAGID 和 DODAG 版本號的組合唯一標識一個 DODAG 版本。
- 第四是秩數。秩數的使用範圍在 DODAG 版本內。秩數建立 DODAG 版本的偏序，定義相對於 DODAG 根的單個節點位置。

3.1.3. 實例、DODAG 和 DODAG 版本

RPL 實例包含一個或多個 DODAG 根。RPL 實例可以提供路由給已訂定的前綴目的地，可以通過 DODAG 根或 DODAG 中的備用路徑到達。這些根為獨立運作，可通過網路進行協調，不像 LLN 一樣受限。

一個 RPL 實例可以包括：

- 多個具有獨立根的不協調 DODAG(不同的 DODAGIDs)
 - * 例如，在城市數據蒐集應用中的多個數據收集點沒有合適的連接可以相互協調，或使用多個 DODAG 的形成以動態和自主分割網路。
- 單個有虛擬根的 DODAG 可在骨幹網上協調 LLN 接收點(使用相同的 DODAGID)。
 - * 例如，多個邊界路由器透過可靠的傳輸鏈接運行，像是支援 IPv6 低功率無線個人區域網路(6LoWPAN)的應用程序，有能力作為相同 DODAG 匯聚點的邏輯等價介面。
- 以上的組合適合某些應用場景。

每個 RPL 封包都與特定的 RPLInstanceID 互相關聯(參見第 11.2 節)，也就是和 RPL 實例相關聯(參見第 5 節)。RPLInstanceID 和應用流量的類型或服務之間對映的提供或自動發現，並不在本文的討論範圍內(將在未來的配套文件中定義)。

圖 1 描繪包括三個 DODAG 根，R1、R2 和 R3 的 DODAG 的 RPL 實例。每個 DODAG 根皆廣告相同的 RPLInstanceID。線條表示父節點和子節點之間的連接。

圖 2 描述 DODAG 版本號的遞增會如何導致新的 DODAG 版本產生。該描述說明 DODAG 版本號遞增會產生不同的 DODAG 拓撲。需要注意，一個新的 DODAG 版本並不總是會有不同的 DODAG

拓撲。只有特定的拓撲更改時，才會產生新的 DODAG 版本，此文件後面會再加以敘述。

請注意，在以下示例中的樹狀結構較簡單，然而 DODAG 結構是允許每個節點在連接時具有多個父節點。

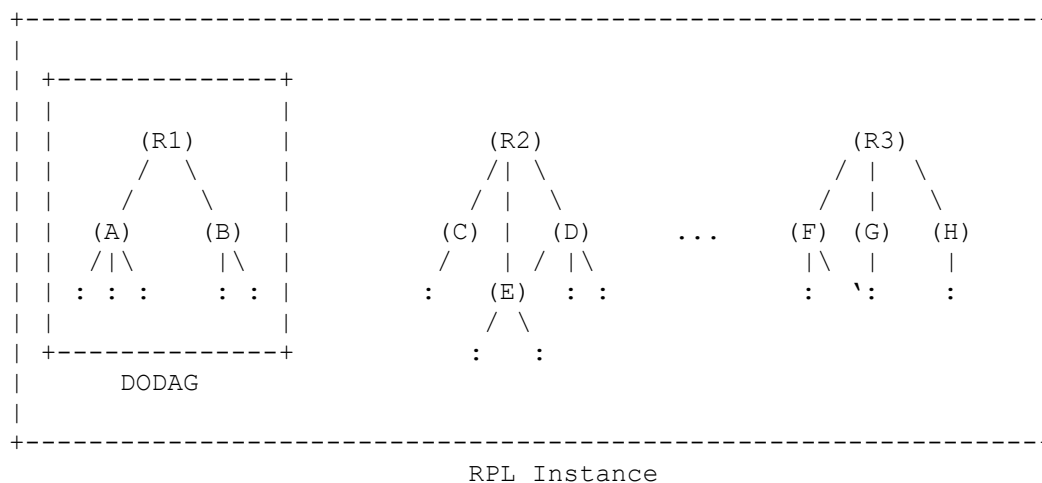


圖 1：RPL 實例

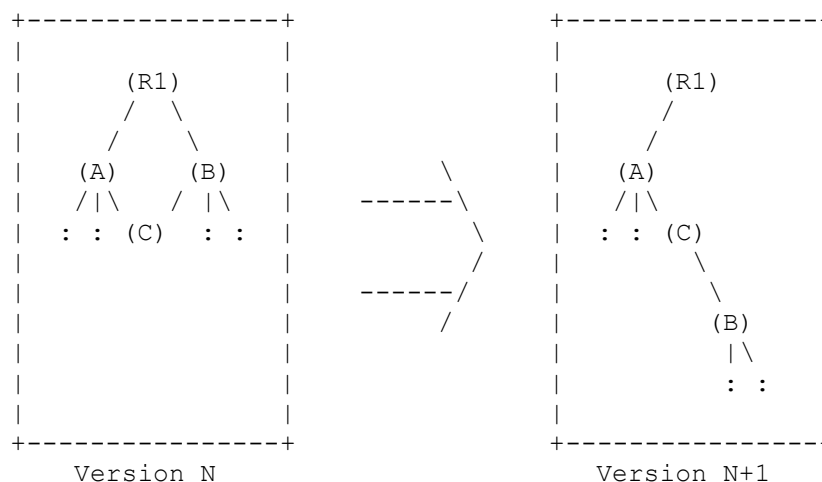


圖 2：DODAG 版本

3.2. 上行路由和 DODAG 的結構

RPL 規定路由向上朝向 DODAG 根，形成 DODAG 並根據目標函數(OF)進行優化。RPL 節點透過 DODAG 資訊物件(DIO)來建構和維護這些 DODAGs。

3.2.1. 目標函數(OF)

在 RPL 實例中，目標函數(OF)定義 RPL 節點如何選擇和優化路由。OF 在 DIO 配置選項中被目標碼點(OCP)定義。OF 在[RFC6551]中定義節點如何將一個或多個的度量和約束，轉換為一個值，名為秩數，近似節點與 DODAG 根的距離。OF 也定義節點如何選擇父節點。進一步的細節可以在第 14 節、[RFC6551]、[RFC6552]和相關的配套規格。

3.2.2. DODAG 修復

DODAG 根通過遞增 DODAG 版本號來完成全域修復操作。這將啟動一個新的 DODAG 版本。在新 DODAG 版本的節點可以選擇新位置，節點秩數不受舊 DODAG 版本中的秩數限制。

RPL 還支援可用於 DODAG 版本的本地修復機制。DIO 訊息規範由 DODAG 根的策略配置來控制必要訊息的參數。

3.2.3. 安全

RPL 支援訊息的機密性和完整性。被設計成可用且適當的鏈結層機制；然而，在沒有此機制的情況下，RPL 可以使用自己的機制。RPL 有三種基本安全模式。

第一個，稱為「不安全」，發送 RPL 控制訊息時沒有任何額外的安全機制。不安全模式並不意味著 RPL 網路是不安全的：它可能正在使用其他網路現在的原始安全機制(例如鏈結層的安全機制)來滿足應用安全要求。

第二個，稱為「預安裝」，節點加入 RPL 實例時預先安裝密鑰，使他們能夠處理和生成安全的 RPL 訊息。

第三種模式稱為「已鑑別」。在已鑑別模式下，節點已預先安裝密鑰，如預安裝模式，但是預安裝的密鑰只能用於將其作為葉節點加入 RPL 實例。將經過身份驗證的 RPL 實例作為路由器加入時，需要獲取來自身份驗證機構的密鑰。獲得的密鑰過程超出本文件的範圍。請注意，此文件並未提供足夠的詳細描述，以便 RPL

實現在認證模式下的安全運行。在認證模式下安全運行 RPL 實現，將會在未來的配套規範中詳細說明節點如何獲取/請求身份驗證的機制材料(例如鑰匙、證書)，以及該從何處獲得。另見第 10.3 節。

3.2.4. 接地的 DODAG 和浮動的 DODAG

DODAG 可以是接地的或浮動地：DODAG 根廣告哪個是這樣的。接地的 DODAG 提供與主機的連接，以滿足應用程序定義的目標地的所需。浮動的 DODAG 不需要滿足目標；在大多數情況下，它只是提供在 DODAG 內到節點的路由。例如，浮動 DODAG 可能是用於維修期間保持互連性。

3.2.5. 本地的 DODAGs

在 LLN 內，RPL 節點可藉由建構一個以 DODAG 根為目的地的本地的 DODAG，以優化到的目的地的路由。與可以包含多個 DODAG 的全域 DAG 不同，本地 DAG 只有一個 DODAG，因此也只有一個 DODAG 根。本地 DODAG 可以在需要時構建。

3.2.6. 管理偏好

實現/部署通過管理偏好來決定哪些 DODAG 根應當優先於其它根使用。管理偏好提供一種控制流量和設計 DODAG 結構的端法，以更好地支援應用的條件或需求。

3.2.7. 資料路徑驗證和循環檢測

LLN 的低功耗和有損性質促使 RPL 使用隨選封包進行需求循環檢測。因為資料流量是很少見的，維持路由拓撲時，物理拓撲結構的改變會耗費能源。典型的 LLN 在物理連接時，表現出瞬間且無礙流量的變化，但從控制平面密切跟蹤變化的花費是相當昂貴的。在有資料要傳送之前，連結的瞬時及偶發變化不需要 RPL 解決。RPL 在這部份的設計是來自現有的、高頻率使用的 LLN 協定，以及關於其效用的大量實驗和部署證據。

使用封包傳輸的 RPL 封包資訊包括傳輸器的秩數。封包的路由決策(上行或下行)和兩個節點之間秩數關係的不一致，表示可能出現循環。在接收這樣的封包時，節點會進行本地修復操作。

例如，如果節點收到移動標記為上行的封包，且該封包記錄的傳輸秩數低於(少於)接收節點的秩數，那麼接收節點就能夠斷定該封包沒有沿上行傳播，且 DODAG 也不一致。

3.2.8. 分散式演算法運算

構建 DODAG 的分散式算法的高層級概述如下：

- 某些節點被配置為 DODAG 根，並帶有關聯的 DODAG 配置。
- 節點通過發送本地鏈結多播 DIO 訊息到所有的 RPL 節點，以廣告他們的存在、與 DODAG 的關係、路由成本，以及相關度量。
- 節點偵聽 DIO，並使用其資訊加入新的 DODAG(進而選擇 DODAG 的父節點)，或根據規定的目標函數和鄰居節點的秩數維持現有的 DODAG。
- 節點透過 DODAG 版本中的父節點，為 DIO 訊息所指定的目的地提供路由表條目。決定加入 DODAG 的節點可以配置一個或多個 DODAG 父節點，作為預設路由的下一跳，以及數個與實例相關的其它外部路由。

3.3. 下行路由和目的地廣告

RPL 使用目的地廣告物件(DAO)訊息來建立下行路由。對於需要點對多點(P2MP)或點對點(P2P)流量的應用程式來說，DAO 訊息是一個可選功能。RPL 支援兩種下行流量模式：儲存(完全狀態的)或非儲存(完全來源路由)模式，參見第 9 節。任何給定的 RPL 實例都是儲存或非儲存模式。在這兩種情況下，P2P 封包都會先向上傳輸到 DODAG 根，再向下到最終目的地(除非目的地在上行路由)。在非儲存模式下，封包在向下傳輸之前，會走過所有到

DODAG 根的路徑。在儲存模式下，封包在到達 DODAG 根之前，通過來源和目的地的共同祖先，可以直接被向下引導至目的地。

在編寫本規範時，還沒有應用能同時運行儲存和非儲存模式。大多數應用皆只支援非下行路由的非儲存模式，或僅支援儲存模式。至於其他模式操作，例如混合儲存和非儲存模式，已超出本規範的範圍，會在其他配套文件中描述。

本規範描述支援 P2P 流量的基本操作模式。注意，更多優化 P2P 解決端案的描述在配套文件中。

3.4. 本地的 DODAGs 路由發現

作為可選的選項，RPL 網路可以支援 DODAG 的隨選發現到 LLN 內的特定目的地。這樣的本地 DODAG 表現出來與全域 DODAG 略有不同：它們由 DODAGID 和 RPLInstanceID 組合唯一定義。RPLInstanceID 表示 DODAG 是否是本地 DODAG。

3.5. 秩數屬性

節點秩數表示 DODAG 版本中該節點位置的標量。秩數用於避免和檢測循環，因此，必須表明某些屬性。最正確的秩數計算由目標函數決定。即使目標函數已完成某些特定的秩數計算，秩數也需要自己實現通用屬性。

特別是，當 DODAG 版本朝向 DODAG 目標接近時，節點的秩數必須單調下降。在這端面，秩數可以被視為是表示 DODAG 版本中節點的位置或半徑的標量。

目標函數如何計算節點秩數的細節不在本規範的範圍，儘管該計算可能取決於，例如，父節點、鏈結指標、節點指標和節點的配置及政策。更多相關資訊請參見第 14 節。

秩數不是路徑成本，儘管其值可以從中導出，並受路徑指標的影響。秩數擁有自己的、不一定屬於上述指標的屬性：

類型：秩數是一個抽象數值。

函數：秩數是 DODAG 版本中節點與鄰居相對位置的表達式，但並不一定能良好的表示或正確的表達該節點到根距離或路徑成本。

穩定性：秩數的穩定性決定路由拓撲的穩定性。建議使用一些阻尼或過濾以保持拓撲穩定；因此，秩數並不一定會像某些鏈結或節點指標一樣快速地改變。新的 DODAG 版本將是一個很好的機會，可以去協調在 DODAG 版本中指標和秩數之間可能形成的差異。

屬性：秩數以嚴格單調的端式增量，它可用於驗證來自或朝向根的進展。度量，如頻寬或抖動，並不一定會展示這個屬性。

抽象：秩數沒有物理單位，而是一個每跳一定範圍的增量，而每個增量的分配是由目標函數決定。

秩數按 RPL 循環避免策略，代入 DODAG 父節點的選擇。一旦加入父節點，就會廣告 DODAG 中節點的秩數，有關 DODAG 內父節點的選擇和移動的更多選項也會受到限制，以避免循環。

3.5.1. 秩數比較(DAGRank())

秩數可以被認為是一個定點數，整數部分和小數部分之間的小數點位置由 MinHopRankIncrease 決定。MinHopRankIncrease 是一個節點和它任意父節點間的最小秩數增量。由 DODAG 根提供 MinHopRankIncrease。MinHopRankIncrease 在跳躍的成本精度和網路支援的最大跳躍數間折衷。一個非常大的 MinHopRankIncrease，例如，允許精確描述一個給定的跳躍對秩數的影響，但是無法支援很多跳躍。

當目標函數計算秩數時，目標函數對整個(即 16 位元)秩數的數值進行運算。當比較秩數時，例如，用於判斷父節點關係或循環檢測時，使用秩數的整數部分。秩數的整數部分由 DAGRank() 巨集計算如下，其中 floor(x) 是用於計算小於或等於 x 最大整數的函數：

$$\text{DAGRank}(\text{rank}) = \text{floor}(\text{rank}/\text{MinHopRankIncrease})$$

舉例來說，如果 16 位元的秩數值是十進制的 27，
MinHopRankIncrease 是十進制的 16，那麼
 $\text{DAGRank}(27) = \text{floor}(1.6875) = 1$ 。Rank 的整數部分是 1，小數部分是 11/16。

以下為本文的規約，其中 $\text{DAGRank}(\text{node})$ 巨集可被解釋為 $\text{DAGRank}(\text{node.rank})$ 。node.rank 是由節點維護的秩數值。

若 $\text{DAGRank}(A)$ 小於 $\text{DAGRank}(B)$ ，表示節點 A 的秩數小於節點 B 的秩數。

若 $\text{DAGRank}(A)$ 等於 $\text{DAGRank}(B)$ ，表示節點 A 的秩數等於節點 B 的秩數。

若 $\text{DAGRank}(A)$ 大於 $\text{DAGRank}(B)$ ，表示節點 A 的秩數大於節點 B 的秩數。

3.5.2. 秩數關係

秩數的計算由 LLN 內任意兩相鄰節點 M 和 N 的以下屬性得出：

$\text{DAGRank}(M)$ 小於 $\text{DAGRank}(N)$:

在這種情況下，M 距離 DODAG 根的位置比 N 更近。此時節點 M 可安全地作為節點 N 的父節點，不會有任何產生循環的風險。進而，節點 N 的父節點集中的所有父節點秩數值必須小於 $\text{DAGRank}(N)$ 。也就是說節點 N 所呈現的秩數，必須大於它的父節點所呈現出的秩數。

$\text{DAGRank}(M)$ 等於 $\text{DAGRank}(N)$:

在這種情況下，DODAG 中的節點 M 和 N 的位置就相對於 DODAG 根而言較相近或完全相等。路由通過具有相同秩數的節點有可能導致路由形成循環(即，那個節點在選擇路由的過程中通過一個具有相同秩數值的節點)。

DAGRank(M)大於 DAGRank(N):

在這種情況下，M 距離 DODAG 根的位置比 N 更遠。此外，節點 M 事實上可能會是節點 N 的 sub-DODAG。如果 N 選擇 M 為父節點，就會有形成循環的風險。

例如，當目標函數最小化的度量是 ETX 或延遲時，可通過密切跟蹤 ETX(期望傳輸次數，用於 LLN 中的一個非常普遍的路由度量，定義於[RFC6551])的端式計算秩數，或採用更複雜的端式，以 DODAG 內正在使用的目標函數計算秩數。

3.6. 路由度量和 RPL 的使用限制

路由度量透過路由協定來計算最短路徑。內部閘道協定(IGPs)，如中間系統對中間系統([RFC5120])和開放最短路徑優先內部閘道協定([RFC4915])使用靜態鏈結度量。這樣的鏈結度量可以簡單地反映頻寬，或者也可以根據定義不同鏈結特性的若干度量的多項式函數來計算。某些路由協定支援不只一個度量：在絕大多數情況下，每個(子)拓撲使用一個度量標準。較少見的是，在存在等價多路徑路由(ECMP)的情況下，第二個度量可以用作決勝局。多個度量的優化被稱為非確定性多項式完整問題，並且有時由一些集中式路徑計算引擎支援。

相比之下，LLNs 需要同時支援靜態和動態度量。此外，鏈結和節點度量都是需要的。對於 RPL 而言，實際上只定義一種度量或是一種複合度量都是不夠的，它需要滿足所有使用情形。

而且，RPL 支援適用於鏈路和節點的基於約束基礎的路由。如果鏈路或節點無法滿足所需的約束，它將從候選的鄰居集中被去除，從而產生受約束的最短路徑。

目標函數定用於計算(受限的)路徑的目標。此外，節點被配置為支援一組度量和約束，並根據 DIO 訊息中公佈的度量和約束，在 DODAG 中選擇它們的父節點。可根據 OF 和度量合併或分別廣告下游上游和下游度量。當它們分別廣告時，可能會導致 DIO 父節點集與 DAO 父節點集(DAO 父節點是發送單播 DAO 訊息的目

標節點)不同。然而，它們都是跟秩數計算規則有關的 DODAG 父節點。

OF 還被 RPL 用於從路由度量和約束中解耦。而 OF 制定如 DODAG 父節點選擇、負載均衡等規則，使用度量和/或約束集合，因此 DIO 訊息中的 DAG 約束選項所攜帶的資訊，決定優選路徑。

支援鏈結/節點的約束和度量集在[RFC6551]中有規定。

範例 1：最短路徑：路徑提供端到端的最短延遲。

範例 2：最短約束路徑：不通過電池供電節點且優化路徑可靠性的路徑。

3.7. 循環避免

當拓撲發生改變時，RPL 會試著避免形成循環。而且當循環真的發生時，RPL 包括基於秩數的資料路徑驗證機制，以便在它們發生時檢測循環（更多詳細資訊請參見第 11 節）。在實作中這意味著 RPL 既不保證無循環徑選擇也不保證緊密延遲收斂次數，但它可以在使用時立即檢測並修護循環。RPL 使用此循環檢測來確保封包在 DODAG 版本中前進，並在必要時觸發修復。

3.7.1. 貪婪和不穩定

如果節點嘗試在 DODAG 版本中移動更深（增加秩數），以增加父節點集的大小，或改善其他度量標準，則該節點是貪婪的。一旦節點加入 DODAG 版本，RPL 就會禁止某些行為，包括貪婪，以防止在 DODAG 版本中產生不穩定性。

假設節點願意接收和處理從自己 sub-DODAG 的節點來的 DIO 訊息，並且通常是比其自身更深的節點。在這種情況下，存在產生回饋循環的可能性，當其中兩個或更多節點在嘗試相互優化時，會繼續在 DODAG 版本中嘗試和移動。在某些情況下，這會導致不穩定。正是由於這個原因，RPL 限制節點可以處理來自更深節點的 DIO 訊息到某種形式的本地修復。這種端法創造一個「事件

視界」，使得節點的行為無法越過此界限而受影響進入到不穩定狀態，此種行為可能來自節點的 sub-DODAG 內。

3.7.1.1 範例：貪婪的父節點選擇和不穩定

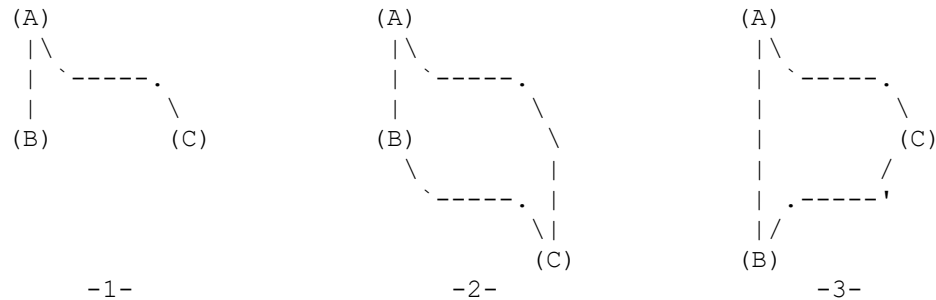


圖 3：貪婪的 DODAG 父節點選擇

圖 3 描繪三種不同配置的 DODAG。在所有三種配置中的 (B) 和 (C) 之間都存在可用鏈結。在圖 3-1 中，節點 (A) 是節點 (B) 和 (C) 的 DODAG 父節點。在圖 3-2 中，節點 (A) 是節點 (B) 和 (C) 的 DODAG 父節點，節點 (B) 也是節點 (C) 的 DODAG 父節點。在圖 3-3 中，節點 (A) 是節點 (B) 和 (C) 的 DODAG 父節點，節點 (C) 也是節點 (B) 的 DODAG 父節點。

如果 RPL 節點太過貪婪，因為它試圖優化超出其最優選父節點額外數量的父節點，因此就會導致不穩定。考慮圖 3-1 中所示的 DODAG。在這個例子中，節點 (B) 和 (C) 可能最喜歡以節點 (A) 作為 DODAG 父節點，但是我們將考慮它們在貪婪條件下操作的情況，嘗試優化兩個父節點。

- 將圖 3-1 設為初始狀態。
- 假設節點 (C) 先離開 DODAG，然後以更低的秩數重新加入，並將節點 (A) 和 (B) 作為其父節點，如圖 3-2 所示。現在節點 (C) 比節點 (A) 和 (B) 更深，並滿足於擁有兩個父節點。
- 假設節點 (B) 在貪婪模式下，願意接收和處理節點 (C) 的 DIO 訊息（違反 RPL 規則），於是節點 (B) 離開 DODAG 並以更低的秩數重新加入，並將節點 (A) 和 (C) 作為其父節點。現在節點 (B) 比節點 (A) 和 (C) 更深，並滿足於擁有兩個 DAG 父節點。

- 接下來，因為節點(C)也是貪婪的，它將離開並重新加入成為更深節點，以再次獲得兩個父節點並擁有比它們更低的秩數。
- 然後，節點(B)再一次離開、以更深的節點加入，並獲得兩個父節點。
- 再一次，節點(C)離開、加入、以更深的節點加入。
- 該過程將重複，DODAG 將在圖 3-2 和圖 3-3 間來回震盪，直到節點計數變成無窮大並再次重啟循環。
- 可通過 RPL 中的機制防止出現此種循環：
 - * 節點(B)和(C)保持秩數值不變，只要此秩數可以滿足於依附它們最優雙親（A），且不再尋找任何更深的（錯誤的）替代雙親（節點不貪婪）。
 - * 節點(B)和(C)不處理來自更深節點的 DIO 訊息（因為這樣的節點可能在它自己的 sub-DODAG 內）。

此機制在 8.2.2.4 節中會作進一步描述。

3.7.2. DODAG 循環

當節點從 DODAG 分離並重新連接到其先前 sub-DODAG 中的設備時，可能發生 DODAG 循環。特別是當丟失 DIO 訊息時可能會發生這種情況。嚴格使用 DODAG 版本號可以消除這種類型的循環，但在使用某些本地修復機制時可能會遇到這種類型的循環。

例如，考慮允許節點從 DODAG 分離的本地修復機制，廣告一個 INFINITE_RANK 秩數(為了毒化其路由/通知其 sub-DODAG)，然後重新連接到 DODAG。在某些情況下，節點可能會重新連接到其先前的 sub-DODAG，進而導致一個 DODAG 循環，因為如果在 LLN 環境中 INFINITE_RANK 廣告丟失，則中毒可能會失敗。(在這種情況下，基於秩數的資料路徑驗證機制最終會檢測並觸發循環的校正。)

3.7.3. DAO 循環

當父節點存在根據從子節點接收和處理的 DAO 訊息設置的路由，而孩子隨後清除相關的 DAO 狀態，此時可以產生 DAO 循環，但是子節點隨後清除相關的 DAO 狀態。當 No-Path(一個使先前宣布的前綴無效的 DAO 訊息，參見第 6.4.3 節)被遺漏並持續到所有狀態都被清除時，就會發生此循環。RPL 包括一個可以減輕遺失 DAO 訊息影響的可選機制來確認 DAO 訊息。RPL 也包括可以減輕 DAO 循環影響並觸發其修復的循環檢測機制。(參見第 11.2.2.3 節)

4. RPL 支援的通信流

RPL 支援三種基本的通信流：多點對點(MP2P)，點對多點(P2MP)和點對點(P2P)。

4.1. 多點對點流量

多點對點(MP2P)是許多 LLN 應用([RFC5867]、[RFC5826]、[RFC5673]和[RFC5548])中的主要通信流。MP2P 流動的目的地是具有某些應用重要性的指定節點，例如提供到更大的網路或核心專用 IP 網路的連接。RPL 藉由允許通過 DODAG 根到達 MP2P 目的地來支援 MP2P 流量。

4.2. 點對多點流量

點對多點(P2MP)是多個 LLN 應用程序([RFC5867]、[RFC5826]、[RFC5673]和[RFC5548])所需的流量模式。RPL 通過使用提供下行路由的目的地廣告機制來支援 P2MP 流量到目的地(前綴，位址或多播組)，且遠離根。目的地廣告可以在下層 DODAG 拓撲更改時更新路由表。

4.3. 點對點流量

RPL 的 DODAG 為點對點(P2P)流量提供基本結構。對於支援 P2P 流量的 RPL 網路，根必須能夠將封包路由到目的地。網路中的節點也可以具有到目的地的路由表。封包流向根，直到它到達

具有到目的地的已知路由的父。正如本文後面所指出的，在最受約束的情況下（當節點不能儲存路由時），該共同父節點可以是 DODAG 根。在其他情況下，它可以是更靠近來源和目的地的節點。

RPL 還支援 P2P 目的地是「單跳」鄰居的情況。

RPL 既沒有指定也沒有排除用於計算和安裝可以更優化的路由，以支援任意 P2P 流量的附加機制。

5. RPL 實例

在給定的 LLN 內，可以存在多個邏輯上獨立的 RPL 實例。一個 RPL 節點可以屬於多個 RPL 實例，並且它可以在某些實例中充當路由器，在其他實例中充當葉節點。本文件描述單個實例的行為。

RPL 實例有兩種類型：本地和全域。RPL 在全域和本地實例之間劃分 RPLInstanceID 空間，以允許 RPLInstanceID 的協調和單面配置。全域 RPL 實例被協調為具有一個或多個 DODAG，並且通常是長期壽命的。本地 RPL 實例總是單個 DODAG，其單個根擁有相應的 DODAGID，並以單端面的端式分配本地 RPLInstanceID。例如，可以使用本地 RPL 實例來建構 DODAG，以支援未來的隨選路由解決端案。本地 RPL 實例的操作模式超出本規範的範圍，會在其他配套規範中描述。

RPL 實例的定義和配置超出本規範的範圍。特定於應用和實現的準則，預計將在未來的配套規範中詳細說明。預期這些操作使得來自 RPL 網路外部的資料封包可以明確地與至少一個 RPL 實例相關聯，並且可以在任何與該封包匹配的實例上安全地路由。

RPL 網路中的控制和資料封包被標記，以明確地識別它們所屬的 RPL 實例。

每個 RPL 控制訊息都有一個 RPLInstanceID 欄位。當提到如下定義的本地 RPLInstanceID 時，一些 RPL 控制訊息還可以包括 DODAGID。

在 RPL 網路內流動的資料封包將 RPLInstanceID 暴露為 RPL 所需的 RPL 封包資訊的一部分，如第 11.2 節中進一步描述的。對於來自 RPL 網路外部的資料封包，入口路由器確定 RPLInstanceID 並將其放入它注入 RPL 網路的結果封包中。

5.1. RPLInstanceID

全域 RPLInstanceID 必須對整個 LLN 是唯一的。分配和提供全域 RPLInstanceID 的機制超出本規範的範圍。整個網路中最多可以有 128 個全域實例。本地實例始終與 DODAGID 結合使用（在某些情況下可以顯式或隱式提供），並且每個 DODAGID 可以支援 64 個本地實例。本地實例由擁有 DODAGID 的節點分配和管理，而不與其他節點明確協調，如下面進一步詳述的。

全域 RPLInstanceID 在 RPLInstanceID 欄位中的編碼如下：

```

  0 1 2 3 4 5 6 7
+---+---+---+---+
|0|         ID         | Global RPLInstanceID in 0..127
+---+---+---+---+

```

圖 4：全域實例的 RPLInstanceID 欄位格式

本地 RPLInstanceID 由擁有 DODAGID 的節點自動配置，並且對於該 DODAGID 必須是唯一的。用於配置本地 RPLInstanceID 的 DODAGID 必須是節點的可達 IPv6 位址，並且必須用作該本地實例內所有通信的端點。

本地 RPLInstanceID 在 RPLInstanceID 欄位中的編碼如下：

```

  0 1 2 3 4 5 6 7
+---+---+---+---+
|1|D|         ID         | Local RPLInstanceID in 0..63
+---+---+---+---+

```

圖 5：本地實例的 RPLInstanceID 欄位格式

在 RPL 控制訊息中，本地 RPLInstanceID 中的 'D' 旗標總是設置為 0。它用於封包中以表示 DODAGID 是封包的來源還是目的地。如果 'D' 旗標設置為 1，則 IPv6 封包的目的地位址必須是

DODAGID。如果'D'旗標被淨空，那麼 IPv6 封包的源位址必須是 DODAGID。

例如，假設節點 A 是本地 RPL 實例的 DODAG 根，並且已經分配本地 RPLInstanceID。根據定義，通過本地 RPL 實例的所有流量將在節點 A 發起或終止。在這種情況下，DODAGID 將會是節點 A 的可達 IPv6 位址。所有流量將包含節點 A 的位址，因此 DODAGID 要不是源位址，就是目的地位址。所以本地 RPLInstanceID 可以通過適當地設置'D'旗標，來表示 DODAGID 是等於源位址或目的地位址。

6. ICMPv6 RPL 控制訊息

本文件定義 RPL 控制訊息，即新的 ICMPv6[RFC4443]信息。RPL 控制訊息由編碼標識，並由依賴於編碼的基礎（以及一系列選項）組成。

大多數 RPL 控制訊息都具有鏈結範圍。唯一的例外是非儲存模式下的 DAO/DAO-ACK 訊息，它們使用多跳的單播位址進行交換，因此對源位址和目的地位址使用全域或唯一本地位址。對於所有其他 RPL 控制訊息，源位址是本地鏈結位址，目的地位址不是全 RPL 節點多播位址，就是目的地的本地鏈結單播位址。全 RPL 節點多播位址是一個新位址，其值為 ff02::1a。

根據[RFC4443]，RPL 控制訊息由一個跟隨訊息體的 ICMPv6 標頭組成。訊息體由訊息庫和可能許多的選項組成，如圖 6 所示。

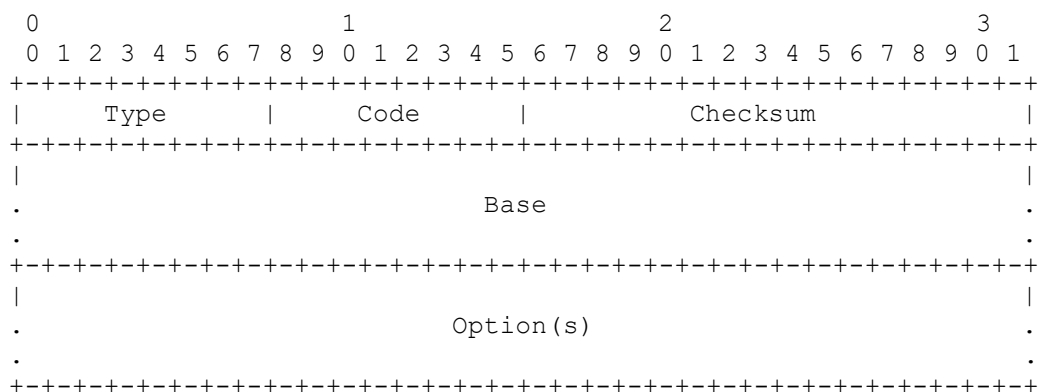


圖 6：RPL 控制訊息

RPL 控制訊息是一種 Type 值為 155 的 ICMPv6 資訊訊息。

編碼欄標識 RPL 控制訊息的類型。本文件定義以下 RPL 控制訊息類型的編碼（參見第 20.2 節）：

- 0x00：DODAG 資訊請求(參見第 6.2 節)
- 0x01：DODAG 資訊物件(參見第 6.3 節)
- 0x02：目的地廣告物件(參見第 6.4 節)
- 0x03：目的地廣告物件應答(參見第 6.5 節)
- 0x80：安全的 DODAG 資訊請求(參見第 6.2.2 節)
- 0x81：安全的 DODAG 資訊物件(參見第 6.3.2 節)
- 0x82：安全的目的地廣告物件(參見第 6.4.2 節)
- 0x83：安全的目的地廣告物件應答(參見第 6.5.2 節)
- 0x8A：一致性檢驗(參見第 6.6 節)

如果節點收到帶有未知編碼欄的 RPL 控制訊息，則節點必須不進行任何進一步處理地丟棄該訊息，可以提出管理警報，且不得發送任何訊息作為回應。

核對和按[RFC4443]中的規定計算。為了下面指定的 RPL 安全運行，核對和被設置為零，一旦包括安全欄位的 RPL 訊息其餘內容全部被設置完畢就會被計算。

編碼的高階位元（0x80）表示 RPL 訊息是否啟用安全性。安全的 RPL 訊息具有支援機密性和完整性的格式，如圖 7 所示。

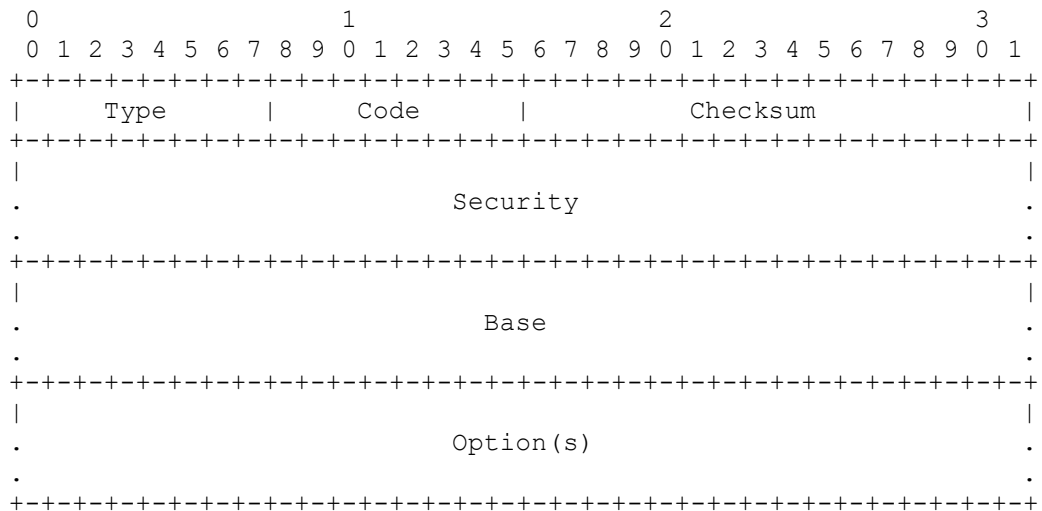


圖 7：安全的 RPL 控制訊息

本節的其餘部分描述當前定義的 RPL 控制訊息基本格式，以及其後的 RPL 控制訊息選項。

6.1. RPL 安全欄位

每個 RPL 訊息都有一個安全的變體。安全變體提供完整性和重播保護，以及可選的機密性和延遲保護。由於安全性涵蓋基本消息和選項，因此在安全消息中，安全資訊位於核對和與 Base 之間，如圖 7 所示。

安全級別和使用的演算法在協定訊息中指出，如下所述：

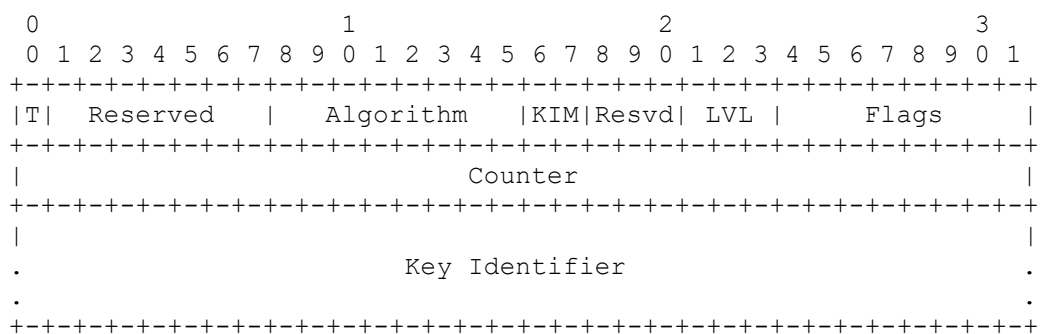


圖 8：安全區段

訊息鑑別碼(MAC)和簽名提供對整個不安全的 ICMPv6 RPL 控制訊息的身份驗證，包括定義整個欄位的安全區段，但需臨時將

ICMPv6 核對和設置為零。加密提供安全 RPL ICMPv6 訊息的機密性，從安全區段之後的第一個位元組開始，並持續到封包的最後一個位元組結束。安全性的轉換產生安全的 ICMPv6 RPL 訊息，其中包含密碼欄位(MAC、簽名等)。換句話說，安全性轉換本身(例如，使用中的簽名和/或演算法)將詳細說明如何將密碼欄位合併到安全的封包中。安全區段本身沒有明確地攜帶那些密碼欄位。第 19 節和第 10 節進一步詳細介紹安全區段的使用。

計數器是時間(T):如果設置計數器的時間旗標，則計數器欄位是時間戳。如果旗標被清除，則計數器是遞增計數器。第 10.5 節描述 'T' 旗標和計數器欄位的細節。

保留：7 位元未使用的欄位。該欄位必須由發送端初始化為零，且接收端必須忽略。

安全演算法(演算法): 安全演算法欄位指定網路使用的加密、MAC 和簽章模式。支援的欄位值如下：

Algorithm	Encryption/MAC	Signature
0	CCM with AES-128	RSA with SHA-256
1-255	Unassigned	Unassigned

圖 9：安全演算法(演算法)編碼

在第 10.9 節更詳細的描述演算法。

金鑰識別符模式(KIM)：金鑰識別符模式是 2 位元欄，其表示用於封包保護的密鑰是顯式確定還是隱式確定，並且表示金鑰識別符欄位的特定表示。金鑰識別符模式設置為下表中的一個值：

Mode	KIM	Meaning	Key Identifier Length (octets)
0	00	Group key used. Key determined by Key Index field. Key Source is not present. Key Index is present.	1
1	01	Per-pair key used. Key determined by source and destination of packet. Key Source is not present. Key Index is not present.	0
2	10	Group key used. Key determined by Key Index and Key Source Identifier. Key Source is present. Key Index is present.	9
3	11	Node's signature key used. If packet is encrypted, it uses a group key, Key Index and Key Source specify key. Key Source may be present. Key Index may be present.	0/9

圖 10：金鑰識別符模式(KIM)編碼

在模式 3(KIM=11)中，金鑰源和金鑰識別符的存在與否取決於下面描述的保全等級(LVL)。如果保全等級表示存在資料加密，則存在該欄位；如果它表示沒有資料加密，則該欄位不存在。

保留：未使用的 3 位元欄。該欄位必須由發送端初始化為零，而接收端必須忽略。

保全等級(LVL)：保全等級是一個 3 位元欄，表示提供的封包保護。該值可以在每個封包基礎上進行調整，並且允許不同等級的資料真實性，並且為可選的，可用於資料機密性。KIM 欄位表示是否使用簽名以及等級欄的含義。請注意，保全等級的分配值不一定是有序的——較高的 LVL 值不

一定等同於安全性的增加。保全等級設置為下表中的一個值：

KIM=0,1,2			
LVL	Attributes	MAC	Len
0	MAC-32	4	
1	ENC-MAC-32	4	
2	MAC-64	8	
3	ENC-MAC-64	8	
4-7	Unassigned	N/A	

KIM=3			
LVL	Attributes	Sig	Len
0	Sign-3072	384	
1	ENC-Sign-3072	384	
2	Sign-2048	256	
3	ENC-Sign-2048	256	
4-7	Unassigned	N/A	

圖 11：保全等級(LVL)編碼

MAC 屬性表示訊息具有指定長度的 MAC。ENC 屬性表示訊息已加密。Sign 屬性表示訊息具有指定長度的簽名。

旗標：為旗標保留的未使用 8 位元欄。該欄位必須由發送端初始化為零，而接收端則必須忽略。

計數器：計數器欄位表示用於建構實現封包保護的加密機制的非重複 4 位元組值，並允許提供語義安全性。見 10.9.1 節。

金鑰識別符：金鑰識別符欄位表示用於保護封包的金鑰。該欄位提供各種等級的封包保護粒度，包括對等金鑰，組金鑰和簽章金鑰。該欄位由金鑰識別符模式欄位表示，格式如下：

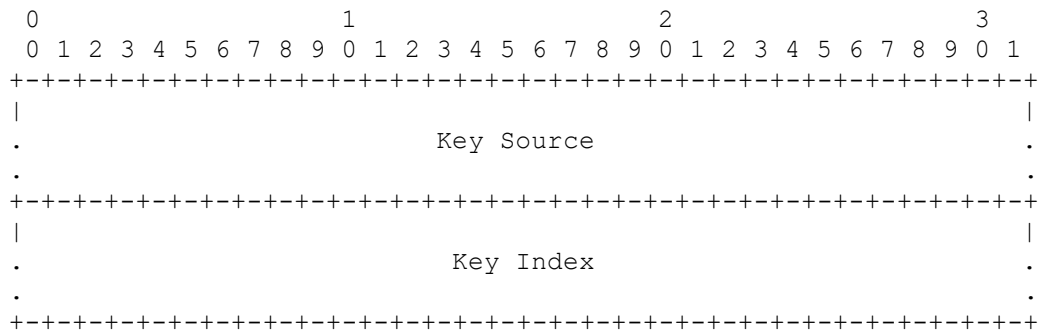


圖 12：金鑰識別符

金鑰源：金鑰源欄位，如果存在則表示組金鑰發起者的邏輯識別符。如果存在，該欄位長度為 8 位元。

金鑰索引：金鑰索引，若存在時，允許使用相同的發起者唯一識別不同的金鑰。每個金鑰發起者都有責任確保它發出的主動使用的金鑰具有不同的金鑰索引，並且所有金鑰索引的值都不等於 0x00。值 0x00 是為預安裝的共享金鑰保留的。當存在時，該欄位的長度為 1 個位元。

保留部分安全區段的未分配位元。它們必須在傳輸時設置為零，且必須在接收時忽略。

6.2. DODAG 資訊請求(DIS)

DODAG 資訊請求(DIS)訊息可用於從 RPL 節點請求 DODAG 資訊物件。其用途類似於 IPv6 鄰居發現中指定的路由器請求；節點可以使用 DIS 來探測附近 DODAG 的鄰域。第 8.3 節描述節點如何回應 DIS。

6.2.1. DIS 基本物件格式

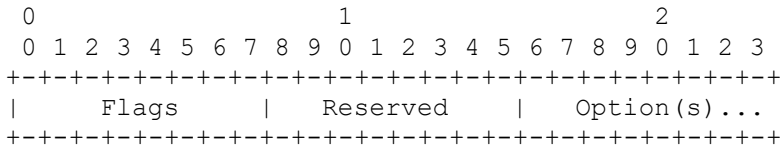


圖 13：DIS 基本物件

旗標：為期標保留未使用的 8 位元欄。該欄位必須由發送端初始化為零，接收端則須忽略。

保留：未使用的 8 位元欄。該欄位必須由發送端初始化為零，接收端則必須忽略。

保留未分配的 DIS 基本欄位。它們必須在傳輸時設置為零，且必須在接收時忽略。

6.2.2. 安全 DIS

安全的 DIS 訊息遵循圖 7 中的格式，其中基本格式是 DIS 訊息，如圖 13 所示。

6.2.3. DIS 選項

DIS 訊息可以攜帶有效選項。

此規範允許 DIS 訊息帶有以下選項：

- 0x00 填充 1
- 0x01 填充 N
- 0x07 請求資訊

6.3. DODAG 資訊物件(DIO)

DODAG 資訊物件攜帶的資訊允許節點發現 RPL 實例、了解其參數的配置、選擇一個 DODAG 父節點集，並維護 DODAG。

6.3.1. DIO 基本物件格式

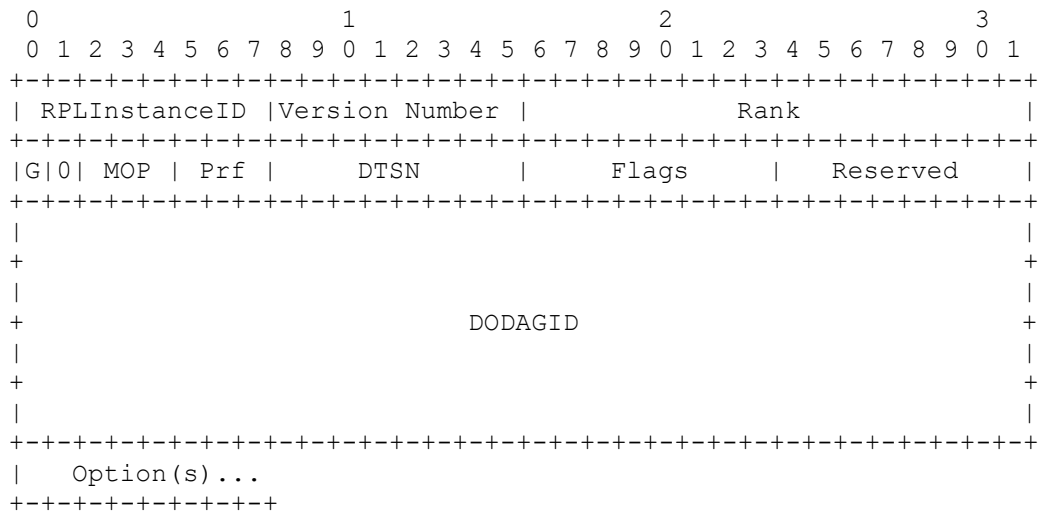


圖 14：DIO 基本物件

接地的(G)：接地的’G’旗標表示 DODAG 所廣告的是否可以滿足應用定義目標。如果旗標位置 1，表示 DODAG 是接地的，否則 DODAG 是浮動的。

運行模式(MOP)：運行模式(MOP)欄位指出 RPL 實例的運行模式在管理上由 DODAG 根提供和分發。所有加入 DODAG 的節點必須能夠遵循 MOP，以便作為路由器充分參與，否則僅能作為葉節點加入。MOP 編碼如下圖所示：

MOP	Description
0	No Downward routes maintained by RPL
1	Non-Storing Mode of Operation
2	Storing Mode of Operation with no multicast support
3	Storing Mode of Operation with multicast support
	All other values are unassigned

值為 0 表示目的地廣告訊息已不可用，DODAG 僅保留上行路由。

圖 15：運行模式編碼

DODAG 優選(Prf)：一個 3 位元的無符號整數，用於定義實例中此 DODAG 的根相比其它 DODAG 根有多優先。DAG 優選的範圍從 0x00(最不優選)到 0x07(最優選)。預設值為 0(最不優選)。第 8.2 節描述 DAG 優選如何影響 DIO 處理。

版本號：DODAG 根設置為 DODAG 版本號的 8 位元的無符號整數。第 8.2 節描述 DODAG 版本號的規則以及它們如何影響 DIO 處理。

秩數：16 位元的無符號整數，表示發送 DIO 訊息節點的 DODAG 秩數。第 8.2 節描述秩數如何設置，以及它如何影響 DIO 處理。

RPLInstanceID：由 DODAG 根設置的 8 位元欄，表示 DODAG 是哪個 RPL 實例。

目的地廣告觸發序號碼(DTSN)：由發出 DIO 訊息的節點設置的 8 位元無符號整數。目的地廣告觸發序號碼(DTSN)旗標用作維護下行路由的過程的一部分。第 9 節介紹此過程的詳細資訊。

旗標：為旗標保留未使用的 8 位元欄。該位元欄必須由發送端初始化為零，接收端則必須忽略。

保留：未使用的 8 位元欄。位元欄必須由發送端初始化為零，接收端必須忽略。

DODAGID：由 DODAG 根設置的 128 位元的 IPv6 位址，用於唯一識別 DODAG。DODAGID 必須是屬於 DODAG 根目錄的可路由 IPv6 位址。

未分配的 DIO 基本位元欄用於保留。它們必須在傳輸時設置為零，且必須在接收時忽略。

6.3.2. 安全的 DIO

安全的 DIO 訊息遵循圖 7 中的格式，其中基本(Base)的格式是圖 14 中所示的 DIO 訊息。

6.3.3. DIO 選項

DIO 訊息可以攜帶有效選項。

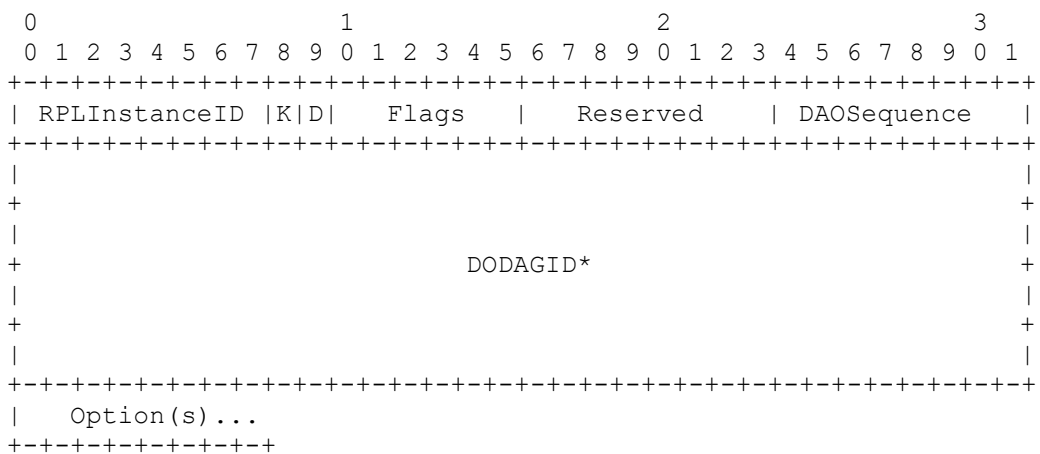
此規範允許 DIO 訊息帶有以下選項：

- 0x00 填充 1
- 0x01 填充 N
- 0x02 DAG 度量容器
- 0x03 路由資訊
- 0x04 DODAG 配置
- 0x08 前綴資訊

6.4. 目的地廣告物件(DAO)

目的地廣告物件(DAO)用於沿 DODAG 上行傳播目的地資訊。在儲存模式中，DAO 訊息由子節點單播到所選的父節點。在非儲存模式下，DAO 訊息單播到 DODAG 根。在顯式請求或錯誤時 DAO 訊息是可選的，目的地將返回目的地廣告確認(DAO-ACK)訊息給 DAO 發送端以進行確認。

6.4.1. DAO 基本物件格式



「*」表示 DODAGID 並不總是存在，如下所述。

圖 16：DAO 基本物件

RPLInstanceID：8 位元欄，表示與 DODAG 關聯的拓撲實例，從 DIO 得知。

K：'K'旗標表示希望接收端發回 DAO-ACK。(見 9.3 節)

D: 'D' 旗標表示存在 DODAGID 欄位。當使用本地 RPLInstanceID 時，必須設置該旗標。

旗標：保留旗標欄位中未使用的 6 位元欄用於旗標。該欄位必須由發送端初始化為零，接收端必須忽略。

保留：未使用的 8 位元欄。該位元欄必須由發送端初始化為零，接收端必須忽略。

DAO 順序：來自節點的每個唯一 DAO 訊息的增量，並在 DAO-ACK 訊息中回應。

DODAGID(可選)：由 DODAG 根設置的 128 位元無符號整數，用於唯一識別 DODAG。該欄位僅在設置 'D' 旗標時出現。該欄位通常僅在使用本地 RPLInstanceID 時才出現，以便識別與 RPLInstanceID 相關聯的 DODAGID。當使用全域 RPLInstanceID 時，不需要存在該欄位。

保留未分配的 DAO 基本位元。它們必須在傳輸時設置為零，並且必須在接收時忽略。

6.4.2. 安全 DAO

安全 DAO 訊息遵循圖 7 中的格式，其中基本格式是圖 16 中所示的 DAO 訊息。

6.4.3. DAO 選項

DAO 訊息可以攜帶有效選項。

此規範允許 DAO 訊息攜帶以下選項：

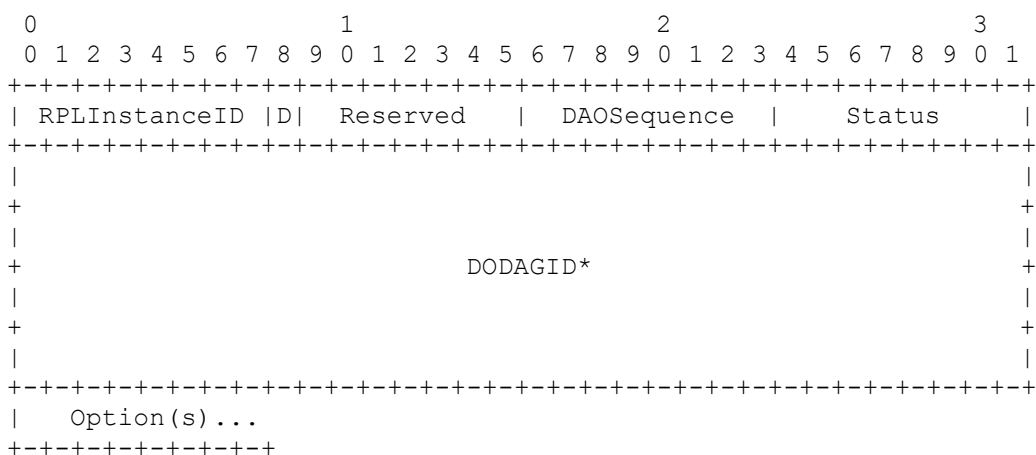
- 0x00 填充 1
- 0x01 填充 N
- 0x05 RPL 目標
- 0x06 傳輸資訊
- 0x09 RPL 目標描述符

一種特殊情況的 DAO 訊息，稱為無路徑，在儲存模式中用於清除已通過 DAO 操作供應的下行路由狀態。無路徑攜帶目標選項和相關的傳輸資訊選項，其壽命為 0x00000000，表示到該目標的可達性丟失。

6.5. 目的地廣告物件確認(DAO-ACK)

DAO-ACK 訊息由 DAO 接收端(DAO 父或 DODAG 根)作為單播封包發送，以回應單播 DAO 訊息。

6.5.1. DAO-ACK 基本物件格式



「*」表示 DODAGID 並不總是存在，如下所述。

圖 17：DAO ACK 基本物件

RPLInstanceID：8 位元欄，表示與 DODAG 關聯的拓撲實例，從 DIO 得知。

D：'D' 旗標表示存在 DODAGID 欄位。這通常僅在使用本地 RPLInstanceID 時設置。

保留：為旗標保留的 7 位元欄。

DAO 順序：隨著來自節點的每個 DAO 訊息的增加，由接收端在 DAO-ACK 中回應。DAO 順序用於關聯 DAO 訊息和 DAO

ACK 訊息，且不能與和 DODAG 下給定目標關聯的傳輸資訊選項路徑順序混淆。

狀態：表示完成。狀態 0 在本規範中被定義為不合格的接受。其餘狀態值保留為拒絕碼。儘管在將來的規範中應根據以下規則分配狀態碼，但本規範中未定義拒絕狀態碼：

0：不合格驗收(即，不拒絕接收 DAO-ACK 的節點)。

1-127：非完全拒絕；發送 DAO-ACK 的節點願意充當父節點，但建議接收節點查找並使用備用的父節點。

127-255：拒絕；發送 DAO-ACK 的節點不願意充當父節點。

DODAGID(可選)：由 DODAG 根設置的 128 位元的無符號整數，唯一識別一個 DODAG。該欄位僅在設置'D'旗標時出現。通常，該欄位僅在使用本地 RPLInstanceID 時才存在，以便識別與 RPLInstanceID 相關聯的 DODAGID。當使用全域 RPLInstanceID 時，不需要存在該欄位。

保留未分配的 DAO-ACK 基本位元。它們必須在傳輸時設置為零，並且必須在接收時忽略。

6.5.2. 安全 DAO-ACK

安全 DAO-ACK 訊息遵循圖 7 中的格式，其中基本格式是圖 17 中所示的 DAO-ACK 訊息。

6.5.3. DAO-ACK 選項

本規範沒有定義 DAO-ACK 訊息要攜帶的任何選項。

6.6. 一致性檢驗(CC)

CC 訊息用於檢驗安全訊息計數器並發出詰問-回應。必須將 CC 訊息作為安全 RPL 訊息發送。

6.6.1. CC 基本物件格式

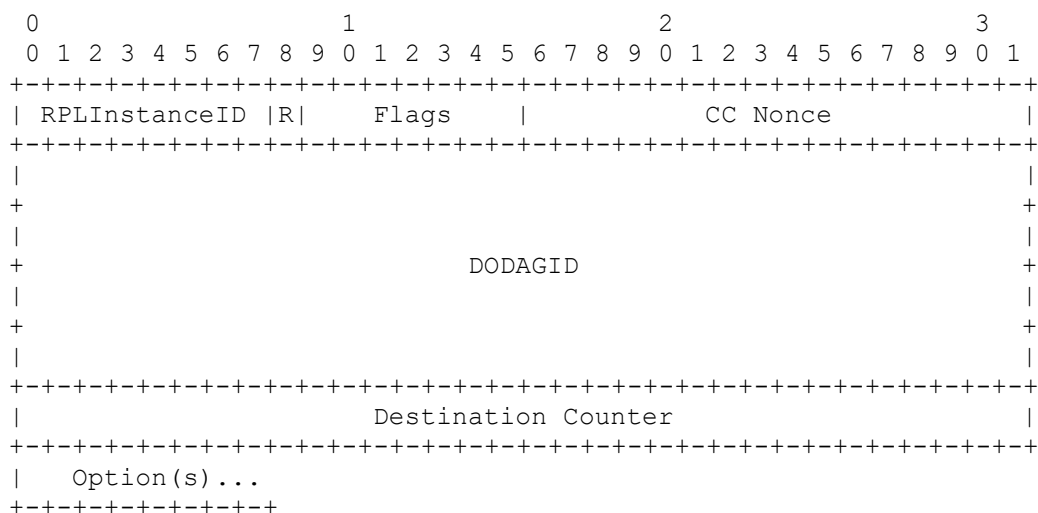


圖 18：CC 基本物件

RPLInstanceID：8 位元欄，表示與 DODAG 關聯的拓撲實例，從 DIO 獲知。

R：'R' 旗標表示 CC 訊息是否是回應。清除 'R' 旗標的訊息是請求；設置 'R' 旗標的訊息是回應。

旗標：旗標欄位中未使用的 7 位元欄保留用於旗標。該欄位必須由發送端初始化為零，接收端必須忽略。

CC Nonce：CC 請求設置的 16 位元無符號整數。CC 請求與其所對應的 CC 回應的 CC Nonce 值相同。

DODAGID：128 位元欄，包含 DODAG 根的識別符。

目標計數器：32 位元無符號整數值，表示發送端對目標的當前安全計數器值的估算。如果發送端沒有估算，則將目標計數器欄位設置為零。

保留未分配的 CC 基本位元。它們必須在傳輸時設置為零，並且必須在接收時忽略。

目標計數器值允許新節點或恢復節點通過 CC 訊息交換重新同步。這對於設備在從導致計數器狀態丟失的故障中恢復的情況下，能否確保不重複給定安全金鑰的計數器值而言很重要。例如，在訊

息安全區段內的初始化計數器，接收到 CC 請求或其他 RPL 訊息後，規定接收的計數器在 CC 回應訊息內，允許請求節點將其輸出的計數器根據回應節點收到的值，重置為大於最後一個接收值的值；接收的計數器也將根據收到的 CC 回應進行更新。

6.6.2. CC 選項

此規範允許 CC 訊息攜帶以下選項：

0x00 填充 1
0x01 填充 N

6.7. RPL 控制訊息選項

6.7.1. RPL 控制訊息選項通用格式

RPL 控制訊息選項通常遵循以下格式：

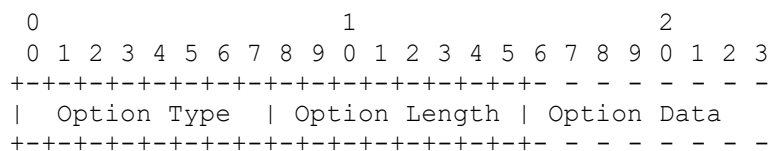


圖 19：RPL 控制選項通用格式

選項類型：選項類型的 8 位元識別符。選項類型值由 IANA 分配(參見第 20.4 節)。

選項長度：8 位元無符號整數，表示選項的八位元組長度，不包括選項類型和長度欄位。

選項資料：包含該選項的特定資料的可變長度欄位。

當處理包含接收端無法識別選項類型值的選項的 RPL 訊息時，接收端必須靜默地忽略無法識別的選項並繼續處理後面的選項，並正確地處理訊息中的任何剩餘選項。

RPL 訊息選項可以具有對齊要求。遵循 IPv6 中的規定，具有對齊要求的選項需在封包中對齊，使得每個選項的選項資料欄位內的

多八位元組落在自然邊界上（即寬度為 n 個八位元組的欄位從標頭的起始在多個 n 個八位元組的整數倍處開始放置，對於 $n = 1, 2, 4$ 或 8 ）。

6.7.2. 填充 1

填充 1 選項可以出現在 DIS、DIO、DAO、DAO-ACK 和 CC 訊息中，其格式如下：

```

0
0 1 2 3 4 5 6 7
+---+---+---+---+
|   Type = 0x00   |
+---+---+---+---+
```

圖 20：填充 1 選項的格式

填充 1 選項用於在訊息中插入單個八位元組填充以使得選項對齊。如果需要不只一個八位元組的填充，則應使用填充 N 選項而不是多個填充 1 選項。

注意！填充 1 選項的格式是一種特殊情況——它既沒有選項長度也沒有選項資料欄位。

6.7.3. 填充 N

填充 N 選項可以出現在 DIS、DIO、DAO、DAO-ACK 和 CC 訊息中，其格式如下：

```

0                               1                               2
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3
+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+
|   Type = 0x01   | Option Length | 0x00 Padding... |
+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+
```

圖 21：填充 N 選項的格式

填充 N 選項用於在訊息中插入兩個或多個填充八位元組的填充，以使得啟用選項對齊。填充 N 選項資料必須被接收端忽略。

選項類型：0x01

選項長度：對於 N 個八位元組的填充，其中 $2 \leq N \leq 7$ ，選項長度欄位包含值 N-2。選項長度為 0 表示總共填充 2 個八位元組。選項長度為 5 表示總共填充 7 個八位元組，這是填充 N 選項允許的最大填充大小。

選項資料：對於填充的 N (N>1) 個八位元組，選項資料由 N-2 個零值八位元組組成。

6.7.4. DAG 度量容器

DAG 度量容器選項可以被用於表示 DIO 或 DAO 訊息，其格式如下：

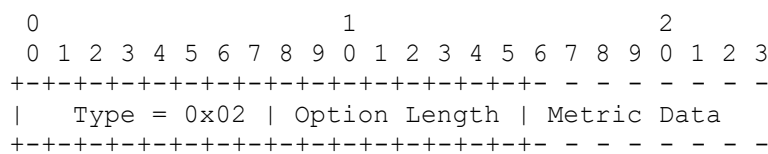


圖 22：DAG 度量容器選項格式

DAG 度量容器用於報告沿著 DODAG 中的度量標準。DAG 度量容器可以包含由制訂人選擇在[RFC6551]中的規範所指定的一些離散節點，鏈結和聚合路徑度量和約束。

DAG 度量容器可以在同一個 RPL 控制訊息中出現多次，例如，適應度量資料長度超過 256 個位元組的範例。更多資訊請參見[RFC6551]。

DAG 度量容器的處理和傳播由特定於實施的策略功能控制。

選項類型：0x02

選項長度：選項長度欄位包含度量標準資料的八位元組長度。

度量資料：DAG 度量容器資料的順序，內容和編碼如[RFC6551]中所述。

6.7.5. 路由資訊

路由資訊選項(RIO)可以存在於 DIO 訊息中，它攜帶與[RFC4191]中定義的 IPv6 鄰居發現(ND)RIO 相同的資訊。DODAG 的根用於權威設置該資訊，並且在 DODAG 向下傳播時保持不變。RPL 路由可以將其簡單地轉換回 ND 選項，以在自己的 RA 中進行廣告，因此連接到 RPL 路由器的節點最終將使用那些封包中從根到目的地的最優選 DODAG。除了現有的 ND 語義之外，目標函數還可以使用此資訊來支援其根最適合特定目標的 DODAG。選項的格式稍有修改(類型、長度、前綴)，以便作為 RPL 選項攜帶，如下所示：

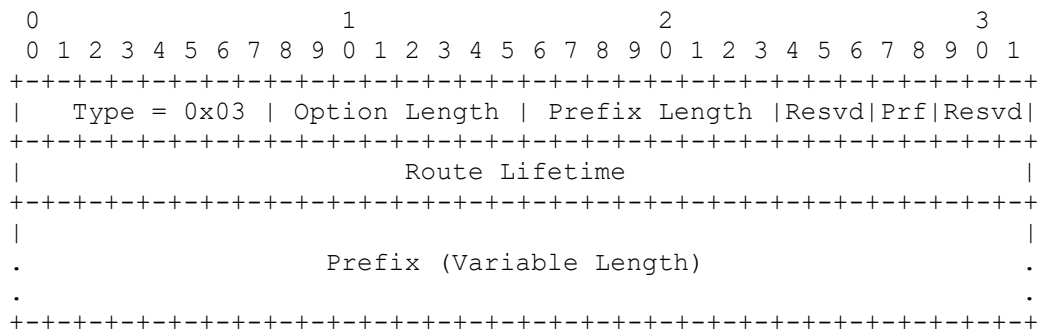


圖 23：路由資訊選項格式

RIO 用於表示從 DODAG 根到指定目的地前綴連接是可用的。

如果 RPL 控制訊息可以需要指定到多個目的地的連接，則可以重複 RIO。

應該以[RFC4191]作為 RIO 的權威參考。為方便起見，此處轉錄欄位說明：

選項類型：0x03

選項長度：變數，八位元組中選項的長度，不包括「類型」和「長度」欄位。請注意，與 IPv6 ND 不同，此長度以單個八位元組為單位表示。

前綴長度：8 位元無符號整數。前綴中有效的前導位數。值的範圍為 0 到 128。「前綴」欄位具有從「選項長度」欄位推斷的位元數，該欄位必須至少為「前綴長度」。請注意，在 RPL 中，這意味著前綴欄位的長度可以不是 0、8 或 16。

優選：2 位有符號整數。路由優先級表示當已經接收到多個相同的前綴（針對不同的路由器）時是否優先選擇與該前綴相關聯的路由器。如果收到保留(10)值，則必須忽略 RIO。根據[RFC4191]，不得發送保留(10)值。([RFC4191]將優選限制為僅三個值，以強調它不是度量標準。)

保留：兩個 3 位未使用的欄位。它們必須由發送端初始化為零，接收端必須忽略它們。

路由壽命：32 位無符號整數。以秒為單位的時間長度(相對於發送封包的時間)，前綴對路由確定有效。所有一位值(0xFFFFFFFF)表示無窮大。

前綴：含有一個 IP 位址或 IPv6 位址的前綴的可變長度欄位。前綴長度欄位包含前綴的有效領導的位數。在前綴長度(如果有的話)之後的前綴的位元被保留，並且必須由發送端被初始化為零，並被接收端忽略。請注意，在 RPL，這個欄位可以具有大於 0、8 個，或 16 個其他長度。

RIO 的未分配位保留。它們必須在傳輸時設置為零，並且必須在接收時忽略。

6.7.6. DODAG 配置

DODAG 配置選項可以存在於 DIO 訊息中，其格式如下：

```

0           1           2           3
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+
|  Type = 0x04 |Opt Length = 14| Flags |A| PCS | DIOIntDoubl. |
+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+
|  DIOIntMin.  |  DIORedun.  |          MaxRankIncrease          |
+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+
|          MinHopRankIncrease          |          OCP          |
+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+
|  Reserved    | Def. Lifetime |          Lifetime Unit          |
+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+---+

```

圖 24：DODAG 配置選項格式

DODAG 配置選項用於通過 DODAG 分配 DODAG 操作的配置資訊。

此選項中傳達的資訊通常是靜態的，並且在 DODAG 內不變，因此不必包含在每個 DIO 中。此資訊在 DODAG 根配置，並通過 DODAG 配置選項分佈在整個 DODAG 中。傳播 DODAG 配置選項時，DODAG 根以外的節點不得修改此資訊。DODAG 根可以偶爾包含該選項(由 DODAG 根確定)，並且必須包括在回應單播請求時，例如：單播 DODAG 資訊請求(DIS)訊息。

選項類型：0x04

選項長度：14

旗標：旗標欄位中未使用的 4 位保留用於旗標。該欄位必須由發送端初始化為零，接收端必須忽略。

驗證啟用(A)：描述網路安全模式的 1 位元旗標。該位描述節點在作為路由器加入網路之前是否必須使用密鑰授權機構進行身份驗證。如果 DIO 不是安全 DIO，則'A'位元必須為零。

路徑控制大小(PCS)：3 位無符號整數，用於配置可分配給路徑控制欄位的位數(見第 9.9 節)。注意，當查詢 PCS 以確定路徑控制欄位的寬度時，添加值 1，即，PCS 值為 0 導致路徑控制欄位中的 1 個有效位。PCS 的預設值為 DEFAULT_PATH_CONTROL_SIZE。

DIOIntervalDoublings：8 位元無符號整數，用於配置 DIO 涓流定時器的 I_{max}(見第 8.3.1 節)。DIOIntervalDoublings 的預設值為 DEFAULT_DIO_INTERVAL_DOUBLINGS。

DIOIntervalMin：8 位元無符號整數，用於配置 DIO 涓流定時器的 I_{min}(見第 8.3.1 節)。DIOIntervalMin 的預設值為 DEFAULT_DIO_INTERVAL_MIN。

DIORedundancyConstant：8 位元無符號整數，用於配置 DIO 涓流定時器的 k(見第 8.3.1 節)。DIORedundancyConstant 的預設值為 DEFAULT_DIO_REDUNDANCY_CONSTANT。

MaxRankIncrease：16 位元無符號整數，用於配置 DAG MaxRankIncrease，允許增加秩數以支援本地修復。如果 DAG 的 MaxRankIncrease 為 0，則此機制不可用。

MinHopRankIncrease：16 位元無符號整數，用於配置 MinHopRankIncrease，如第 3.5.1 節所述。MinHopRankIncrease 的預設值為 DEFAULT_MIN_HOP_RANK_INCREASE。

目標編碼點(OCP): 16 位無符號整數。OCP 欄位識別 OF 並由 IANA 管理。

保留：7 位未使用的欄位。該欄位必須由發送端初始化為零，接收端必須忽略。

預設壽命：8 位元無符號整數。這是所有 RPL 路由的預設壽命。它以壽命單位為單位表示，例如，預設壽命(秒)是(預設壽命)*(壽命單位)。

壽命單位：16 位無符號整數。提供以秒為單位的單位，用於表示 RPL 中的路線壽命。對於非常穩定的網路，它可以是數小時到數天。

6.7.7. RPL 目標

RPL 目標選項可以出現在 DAO 訊息中，其格式如下：

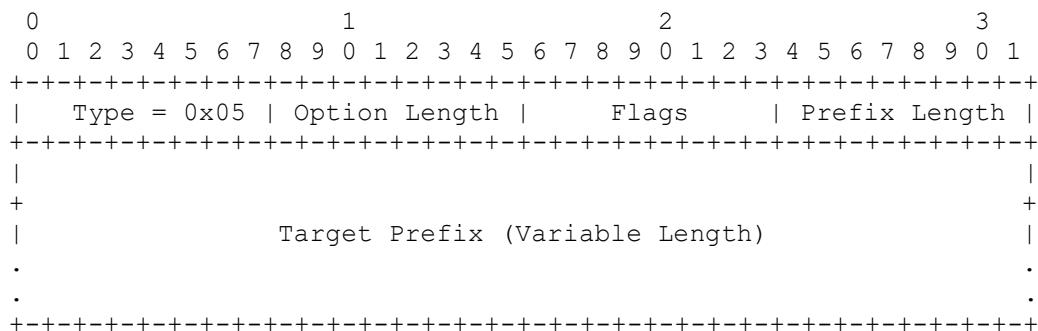


圖 25：RPL 目標選項的格式

RPL 目標選項用於表示可沿 DODAG 訪問或查詢的目標 IPv6 位址，前綴或多播組。在 DAO 中，RPL 目標選項表示可達性。

RPL 目標選項可以選擇與符合目標的 RPL 目標描述符選項(圖 30)配對。

一組一個或多個傳輸資訊選項(第 6.7.8 節)可以直接跟隨 DAO 訊息中的一個或多個目標選項的集合(其中每個目標選項可以與上面的 RPL 目標描述符選項配對)。第 9.4 節進一步描述 DAO 訊息的結構，詳細說明目標選項如何與傳輸資訊選項一起使用。

可以根據需要重複 RPL 目標選項以表示多個目標。

選項類型：0x05

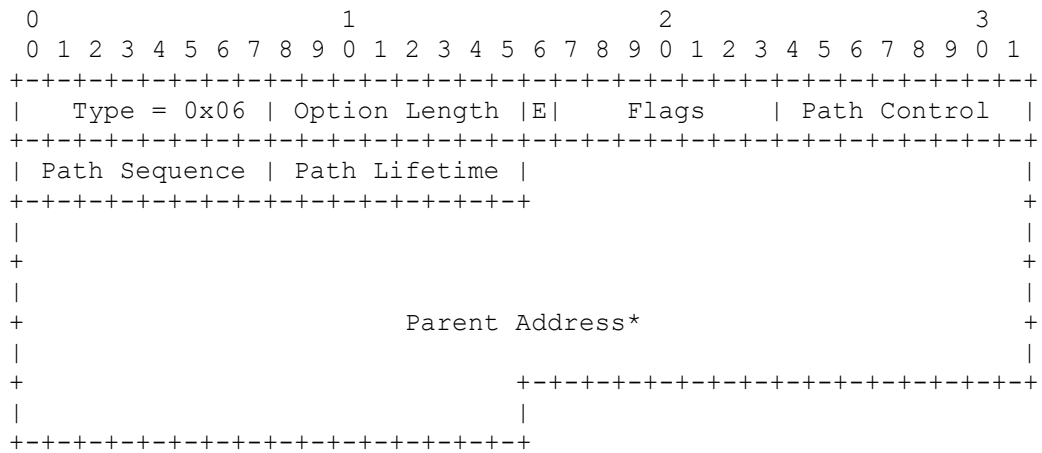
選項長度：變數，八位元組中選項的長度，不包括「類型」和「長度」欄位。

旗標：為旗標保留的 8 位未使用欄位。該欄位必須由發送端初始化為零，接收端必須忽略。

前綴長度：8 位元無符號整數。IPv6 前綴中的有效前導位數。

6.7.8. 傳輸資訊

傳輸資訊選項可以出現在 DAO 訊息中，其格式如下：



「*」表示該 DODAG 父節點位址子欄位並非總是存在，如下文所述。

圖 26：傳輸資訊選項的格式

傳輸資訊選項用於節點以表示到一個或多個目的地的路徑屬性。目的地由一個或多個緊靠傳輸資訊選項之前的目標選項表示。

傳輸資訊選項可用於向節點其 DODAG 父節點，表示正在收集 DODAG 路由資訊的祖先，通常用於建構源路由。在非儲存操作模式中，此祖先將是 DODAG 根，並且此選項由 DAO 訊息攜帶。在儲存操作模式中，不需要 DODAG 父位址子欄位，因為 DAO 訊息直接發送到父節點。選項長度用於確定是否存在 DODAG 父位址子欄位。

具有多個 DAO 父節點的非儲存節點可以包括每個 DAO 父節點的傳輸資訊選項，作為非儲存目的地廣告操作的一部分。節點可以在不同的 DAO 父節點組中的路徑控制欄位中分配位元，以便在父節點之間發信號通知偏好。當在用於構建下行路由的替代父節點/路徑中進行選擇時，該偏好可以影響 DODAG 根的決定。

一個或多個傳輸資訊選項必須在一個或多個 RPL 目標選項之前。以這種方式，RPL 目標選項表示子節點，且傳輸資訊選項列舉 DODAG 父節點。第 9.4 節進一步描述 DAO 訊息的結構，進一步詳細說明目標選項如何與傳輸資訊選項接合使用。

典型的非儲存節點將使用多個傳輸資訊選項，並且它將如此形成的 DAO 訊息直接發送到根。典型的儲存節點將使用一個沒有父

集點欄位的傳輸資訊選項，並且將如此形成的 DAO 訊息發送給一個或多個父節點，並進行附加調整，如後面詳細描述的路徑控制。

例如，在非儲存操作模式中，讓 $Tgt(T)$ 表示目標 T 的目標選項。讓 $Trnst(P)$ 表示包含父位址 P 的傳輸資訊選項。考慮非儲存的情況節點 N ，它廣告自有目標 $N1$ 和 $N2$ ，並具有父節點 $P1$ 、 $P2$ 和 $P3$ 。在那種情況下，預期 DAO 訊息將包含順序 $((Tgt(N1), Tgt(N2)), (Trnst(P1), Trnst(P2), Trnst(P3)))$ ，如此一來，目標選項組 $\{N1, N2\}$ 由傳輸資訊選項描述為具有父節點的 $\{P1, P2, P3\}$ 。然後，非儲存節點將該 DAO 訊息直接尋址到 DODAG 根並通過 DODAG 父節點之一轉發該 DAO 訊息： $P1$ 、 $P2$ 或 $P3$ 。

選項類型：0x06

選項長度：可變的，取決於 DODAG 父節點位址的子欄位是否存在。

外部(E)：1 位元旗標。設置 'E' 旗標以表示父路由器將外部目標重新分配到 RPL 網路中。外部目標是通過交替協定學習的目標。外部目標列在傳輸資訊選項之前的目標選項中。外部目標預計不支援 RPL 訊息和選項。

旗標：保留旗標欄位中未使用的 7 位元用於旗標。該欄位必須由發送端初始化為零，接收端必須忽略。

路徑控制：8 位的位元欄。路徑控制欄位限制可以向其發送與特定目的地廣告連接的 DAO 訊息的 DAO 父節點數量，以及提供相對偏好的一些表示。該限制為 LLN 中的整體 DAO 訊息輸出提供一些限制。路徑控制中位元的分配和排序也用於溝通優選。根據 DODAG 配置中的 PCS，並非所有這些位元都可以啟用。路徑控制欄位分為四個子欄位，每個子欄位包含兩個位元： $PC1$ 、 $PC2$ 、 $PC3$ 和 $PC4$ ，如圖 27 所示。子欄位按優先順序排序， $PC1$ 是最優選的， $PC4$ 是最不優選的。在子欄位內，沒有優先順序。通過對父節點進行分組(如在 ECMP 中)並對它們進行排序，父節點能以溝通優選的方式與路徑控制欄位中的特定位元相關聯。

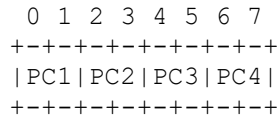


圖 27：路徑控制優選子欄位編碼

路徑順序：8 位元無符號整數。當擁有目標前綴的節點(即，在 DAO 訊息中)發出 RPL 目標選項時，該節點設置路徑順序，並在每次發布具有更新資訊的 RPL 目標選項時遞增路徑順序。

路徑壽命：8 位元無符號整數。壽命單位(從「配置」選項獲得)中，該時間長度的前綴對路徑確定是有效的。當看到新的路徑順序時，該時段開始。所有一位元(0xFF)的值表示無窮大。所有零位元(0x00)的值表示可達性的喪失。在本文件中，包含目標路徑壽命為 0x00 的傳輸資訊選項的 DAO 訊息稱為無路徑(針對該目標)。

父位址(可選)：最初發出傳輸資訊選項的節點的 DODAG 父節點 IPv6 位址。根據 DODAG 操作模式(儲存或非儲存)，並由傳輸資訊選項長度表示，該欄位可以不存在。

保留傳輸資訊選項的未分配位元。它們必須在傳輸時設置為零，並且必須在接收時忽略。

6.7.9. 請求資訊

請求資訊選項可以出現在 DIS 訊息中，其格式如下：

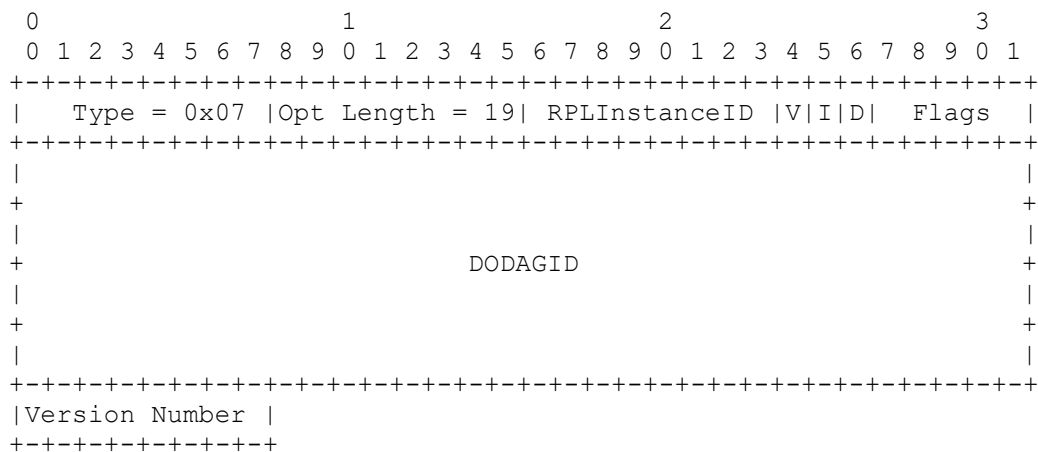


圖 28：請求資訊選項格式

請求資訊選項用於節點從相鄰節點的子集請求 DIO 訊息。請求資訊選項可以訂定由接收節點匹配的多個述詞準則。請求者使用它來限制「非感興趣」節點的回復數量。這些述詞會影響節點是否重置其 DIO 涓流計時器，如第 8.3 節所述。

請求資訊選項包含旗標，表示節點在決定是否重置其涓流計時器時應檢查哪些述詞。當所有述詞都為真時，節點重置其涓流計時器。如果設置旗標，那麼 RPL 節點必須檢查相關的述詞。如果清除一個旗標，那麼 RPL 節點不得能檢查相關的述詞。(如果一個旗標被清除，則 RPL 節點假定關聯的述詞為真。)

選項類型：0x07

選項長度：19

V：'V'旗標是版本述詞。如果接收端的 DODAG 版本號與請求的版本號匹配，則版本述詞為真。如果清除'V'旗標，則版本欄位無效，並且版本欄位必須在傳輸時設置為零，在接收時忽略。

I：'I'旗標是實例 ID 述詞。當 RPL 節點的當前 RPLInstanceID 與請求的 RPLInstanceID 匹配時，實例 ID 述詞為真。如果清除'I'旗標，則 RPLInstanceID 欄位無效，並且 RPLInstanceID 欄位必須在傳輸時設置為零，在接收時忽略。

D: 'D' 旗標是 DODAGID 述詞。如果 RPL 的父節點集與 DODAGID 欄位具有相同的 DODAGID，則 DODAGID 述詞為真。如果清除 'D' 旗標，則 DODAGID 欄位無效，DODAGID 欄位必須在傳輸時設置為零，並在收到時忽略。

旗標：旗標欄位中未使用的 5 位保留用於旗標。該欄位必須由發送端初始化為零，接收端必須忽略。

版本號：8 位元無符號整數，包含有效時請求的版本號碼值。

RPLInstanceID：8 位元無符號整數，包含有效時請求的 RPLInstanceID。

DODAGID：128 位元無符號整數，包含有效時請求的 DODAGID。

保留請求資訊選項的未指定位元。它們必須在傳輸時設置為零，並且必須在接收時忽略。

6.7.10. 前綴資訊

前綴資訊選項(PIO)可以存在於 DIO 訊息中，並攜帶在[RFC4861]，[RFC4862]和[RFC6275]中的 IPv6 ND 前綴資訊選項指定的資訊，供 RPL 節點和 IPv6 主機使用。特別是，RPL 節點可根據[RFC4862]中定義父節點廣告的前綴，將此選項用於無狀態位址自動配置(SLAAC)，並且按照[RFC6275]中的規定廣告自己的位址。DODAG 的根目錄權威設置該資訊。資訊在 DODAG 下傳播不變，但如果 'R' 旗標在 PIO 中設置為完整位址，則 RPL 路由器可以重寫介面 ID。修改此選項的格式(類型，長度，前綴)，以便作為 RPL 選項攜帶，如下所示：

如果在 DIO 中接收到的 PIO 的唯一期望，是將父節點的全域位址提供給接收節點，則發送端重置 'A' 和 'L' 位元並設置 'R' 位元。收到後，RPL 不會從前綴[RFC4862]自動配置位址或連接的路由。與所有情況一樣，當未設置 'L' 位元時，RPL 節點可以在發送給其子節點的 PIO 中包含前綴。

得傳播設置'L'旗標的 PIO。充當路由器的 RPL 節點可以傳播未設置'L'旗標的 PIO。

A：1 位元自律位址配置旗標。設置時，表示此前綴可用於 [RFC4862] 中規範的無狀態位址配置。當兩個協定 (ND RAs 和 RPL DIOs) 用於在同一鏈結上攜帶 PIO 時，可以通過 RPL 節點使用任一協定進行 SLAAC。通過強制該協定中攜帶的 PIO 的 'A' 旗標為 0，也可以使任一協定不符合 SLAAC 操作的條件。

R：1 位元路由器位址旗標。設置時，表示前綴欄位包含分配給發送路由器的完整 IPv6 位址，可以在目標選項中用作父節點。表示的前綴是前綴欄位的第一個前綴長度位元。路由器 IPv6 位址具有相同的範圍，並且符合與廣告的前綴相同的壽命值。前綴欄位的使用與其在廣告前綴本身時的使用兼容，因為前綴廣告僅使用前導位元。因此，對該旗標位元的解釋獨立於 on-link 'L' 和自律位址配置 'A' 旗標位所需的處理。

保留 1：5 位元未使用的欄位。它必須由發送端初始化為零，接收端必須忽略它。

有效壽命：32 位元的無符號整數。以秒為單位的時間長度 (相對於發送封包的時間)，其前綴對於 on-link 的確定有效。所有一位元的值 (0xFFFFFFFF) 表示無窮大。[RFC4862] 也使用有效壽命。

優選壽命：32 位元無符號整數。以秒為單位的時間長度 (相對於發送封包的時間)，從前綴通過無狀態位址自動配置生成位址保持優選 [RFC4862] 的時間。所有一個位元的值 (0xFFFFFFFF) 表示無窮大。參見 [RFC4862]。請注意，此欄位的值不能超過有效壽命欄位，以避免優選位址不再有效。

保留 2：此欄位未使用。它必須由發送端初始化為零，接收端則必須忽略它。

前綴：IPv6 位址或 IPv6 位址的前綴。前綴長度欄位包含前綴中有效前導位元的數量。前綴長度之後的前綴中的位元被保留，並且必須由發送端初始化為零，且由接收端忽略。路由器不應該為本地鏈結前綴發送前綴選項，主機應該忽略這樣的前綴選項。非儲存節點應該避免廣告前綴，直到它擁有該前綴的位址，然後它應該在該欄位中廣告其完整位址，並設置'R'旗標。如此通過設置'R'旗標來廣告完整位址的節點的子節點可以使用該位址來確定傳輸資訊選項的 DODAG 父位址子欄位的內容。

保留 PIO 的未分配位元。它們必須在傳輸時設置為零，並且必須在接收時忽略。

6.7.11. RPL 目標描述符

RPL 目標選項可以緊跟一個不透明的描述符，該描述符限定該特定目標。

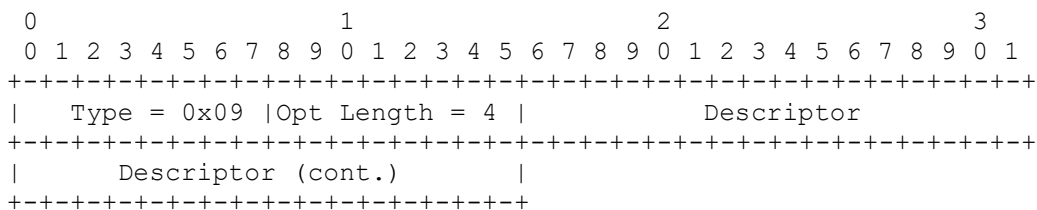


圖 30：RPL 目標描述符選項的格式

RPL 目標描述符選項用於限定目標，有時稱為「加標」。

每個目標最多可以有一個描述符。描述符由在 RPL 網路中注入目標的節點設置。它必須被複製但不被路由器修改，這些路由器在 DAO 訊息中傳播目標向上 DODAG。

選項類型：0x09

選項長度：4

描述符：32 位元無符號整數。不透明。

7. 順序計數器

本節描述 RPL 中 RPL 中序列計數器的啟動和運行總體方案，例如 DIO 訊息中的 DODAG 版本號，DAO 訊息中的 DAO 順序，以及傳輸資訊選項中的路徑順序。

7.1. 順序計數器綜述

該規範使用三個不同的序號來驗證協定資訊的新鮮度和同步：

DODAG 版本號：此順序計數器存在於 DIO 基本中，用於表示正在形成的 DODAG 的版本。每次根決定形成 DODAG 的新版本時，DODAG 版本號都會被根單調遞增，以便重新驗證完整性並允許進行全域修復。當路由器加入新的 DODAG 版本時，DODAG 版本號都會沿 DODAG 向下無變化傳播。DODAG 版本號在 DODAG 中具有全域重要性，表示正在運行的路由器的 DODAG 版本。較舊(較小)的值表示發起路由器尚未遷移到新的 DODAG 版本，並且一旦接收節點遷移到較新的 DODAG 版本，就不能用作父節點。

DAO 順序：順序計數器存在於 DAO 基本中，用於關聯 DAO 訊息和 DAO ACK 訊息。DAO 序號為發送 DAO 訊息節點的本地旗標，用於自身檢測丟失的 DAO 訊息，以便進行重試。

路徑順序：此順序計數器存在於 DAO 訊息的傳輸資訊選項中。此計數器的目的是在多個路由併列存在於同一目標的冗餘場景中，區分新路由取代舊路由的傳輸。路徑順序在 DODAG 中是全域重要的，並表示到相關目標的路由的新鮮度。從源路由器接收的較舊(較小)值表示源路由器保持舊路由狀態，且不應該將源路由器視為目標的潛在下一跳。路徑順序由廣告目標的節點計算，該節點即目標本身或代表主機廣告目標的路由器，並且由於父路由器將 DAO 內容傳播到根目錄而未更改。如果主機沒有將計數器傳遞給其路由器，則路由器負責代表主機計算路徑順序，並且主機只能以此目的註冊到一個路由器。如果為了路由冗餘，在給定的時間點向多個父節點發出包含相同目標的 DAO

訊息，則路徑順序在該相同目標的所有 DAO 訊息中是相同的。

7.2. 順序計數器操作

RPL 順序計數器以「棒棒糖」方式細分[Perlman83]，其中大於等於 128 的值用作線性順序以表示重啟和引導計數器，且小於或等於 127 的值用作大小為 128 的循環序號空間，如[RFC1982]中所示。當從線性區域過渡到循環區域時，需要考慮操作模式。最後，在循環區域中操作時，如果檢測到序號相差太多，則它們不具有可比性，如下所述。

比較窗口，SEQUENCE_WINDOW=16，是基於值 2^N 配置，N 在本規範中被定義為 4。

對於給定的順序計數器：

1. 順序計數器應該初始化為實現定義值，在使用之前為 128 或更大。建議值為 $240(256 - \text{SEQUENCE_WINDOW})$ 。
2. 當順序計數器遞增，會導致順序計數器增加到超過其最大值時，順序計數器必須繞回到零。當遞增一個大於或等於 128 的順序計數器時，最大值為 255。當遞增一個小於 128 的順序計數器時，最大值為 127。
3. 比較兩個順序計數器時，必須應用以下規則：
 1. 當第一順序計數器 A 在[128..255]區間內，且第二順序計數器 B 在[0..127]中時：
 1. 如果 $(256 + B - A)$ 小於等於 SEQUENCE_WINDOW，則 B 大於 A，A 小於 B，且兩者不相等。
 2. 如果 $(256 + B - A)$ 大於 SEQUENCE_WINDOW，則 A 大於 B，B 小於 A，且兩者不相等。

例如，如果 A 是 240，B 是 5，那麼 $(256 + 5 - 240)$ 是 21。21 大於 `SEQUENCE_WINDOW(16)`；因此，240 大於 5。作為另一個例子，如果 A 是 250 而 B 是 5，那麼 $(256 + 5 - 250)$ 是 11。11 小於 `SEQUENCE_WINDOW(16)`；因此，250 小於 5。

2. 在要比較的兩個順序計數器小於或等於 127 的情況下，以及在要比較的兩個順序計數器大於或等於 128 的情況下：

1. 如果兩個順序計數器之間差的絕對值大小小於或等於 `SEQUENCE_WINDOW`，則使用[RFC1982]中描述的比較來確定大於、小於等於的關係。

2. 如果兩個順序計數器之間差的絕對值大小大於 `SEQUENCE_WINDOW`，則發生去同步，且兩個序號不可比較。

4. 如果確定兩個序號不具有可比性，即未定義比較結果，則節點應以這樣的方式進行評估，以便將優先權給予最近觀察到的有增加的序號。若失敗，節點應以這樣的方式進行評估，以便最小化對其自身狀態的結果改變。

8. 上行路由

本節介紹 RPL 如何發現和維護上行路由。它描述 DODAG 資訊物件(DIO)的使用，訊息是用於發現和維護這些路由。它規定 RPL 如何生成和回應 DIO。它還描述用於觸發 DIO 傳輸的 DODAG 資訊請求(DIS)訊息。

如第 3.2.8 節所述，決定加入 DODAG 的節點必須至少配置一個 DODAG 父節點作為關聯實例的預設路由。此預設路由使封包能夠向上轉發，直到它最終到達共同的祖先，從該祖先將其下行路由到目的地。如果目的地不在 DODAG 中，則 DODAG 根能藉由連接到 DODAG 外部來轉發封包；若其無法將封包轉發到外部，則 DODAG 根必須丟棄它。

DIO 訊息還可以傳輸顯式路由資訊：

DODAGID：DODAGID 是根的全域或唯一本地 IPv6 位址。加入 DODAG 的節點，需提供經 DODAG 父節點，到達根作為 DODAGID 使用地址的主機路由。

RIO 前綴：根可以在 DIO 訊息中放置一個或多個路由資訊選項。RIO 用於廣告可以經過根的外部路由，與優選相關聯，如第 6.7.5 節所述，其中包含來自[RFC4191]的 RIO。它被解釋為根的能力，而不是路由廣告，且其不得在另一個路由協定中重新分配，雖然封包在進入 RPL 域時，會藉由通過的入口 RPL 路由器選擇 DODAG。目標函數可以使用在 RIO 中公佈的路由或這些路由的優選，以便支援 DODAG，而不是同一個實例的另一個路由。

8.1. DIO 基本規則

1. 對於以下 DIO 基本欄位，不是 DODAG 根的節點必須廣告與其優選 DODAG 父節點相同的值(在第 8.2.1 節中定義)。通過這種方式，這些值將在 DODAG 下傳播不變，並由具有到該 DODAG 根路徑的每個節點廣告。這些欄位如下：
 1. 接地(G)
 2. 操作模式(MOP)
 3. DAG 優選(Prf)
 4. 版本
 5. RPLInstanceID
 6. DODAGID
2. 節點可以在每一跳更新以下欄位：
 1. 秩數
 2. DTSN
3. 每個根集的 DODAGID 欄位必須在 RPL 實例中是唯一的，並且必須是屬於根的可路由 IPv6 位址。

8.2. 上行路由的發現和維護

上行路由發現允許節點加入 DODAG，藉由鄰居發現 DODAG 成員，並識別一組父節點。選擇鄰居和父節點的確切政策取決於實施，並由 OF 驅動。本節指定一系列為保證互操作性所必須遵守的規則。

8.2.1. DODAG 版本中的鄰居和父節點

RPL 的上行路由發現算法和處理，是根據本地鏈結節點的三個邏輯集合。首先，候選鄰居集是可以通過本地鏈結多播到達的節點子集。該集的選擇是實現和 OF 依賴。其次，父節點集是候選鄰居集的受限子集。最後，優選父節點是父節點集在上行路由中優選下一跳的成員。從概念上講，優選父節點是單親；但是，如果這些父節點同樣優先並且具有相同的秩數，則它可以是一組多個父節點。

更確切地說：

1. DODAG 父集必須是候選鄰居集的子集。
2. DODAG 根必須有一個大小為零的 DODAG 父集。
3. 不是 DODAG 根的節點可以維護大小大於或等於 1 的 DODAG 父集。
4. 節點的優選 DODAG 父必須是其 DODAG 父集的成員。
5. 節點的秩數必須大於其 DODAG 父集的所有元素。
6. 當鄰居不可達性檢測(NUD)[RFC4861]或等效機制確定鄰居不再可達時，RPL 節點在計算和廣告路由時，直到確定它可以再次到達為止，不得考慮候選鄰居集中的此節點。必須從路由表中刪除通過不可達的鄰居的路由。

這些規則確保 DODAG 中的節點上存在一致的部分順序。只要節點秩數沒有改變，遵循上述規則就可以確保每個節點到達 DODAG 根的路由都是無循環的，因為每次跳轉到根時秩數減少。

OF 可以指導候選鄰居集和父集選擇，如[RFC6552]中所討論的。

8.2.2. 跨 DODAG 版本的鄰居和父節點

上述規則管理單個 DODAG 版本。本節中的規則定義當存在多個 DODAG 版本時 RPL 如何操作。

8.2.2.1 DODAG 版本

1. 元組(RPLInstanceID、DODAGID、DODAG 版本號)唯一地定義 DODAG 版本。節點的 DODAG 父集裡每個元素由最後聽到的來自每個 DODAG 父節點的 DIO 訊息傳達，必須屬於同一個 DODAG 版本。節點的候選鄰居集的元素可以屬於不同的 DODAG 版本。
2. 節點是 DODAG 版本的成員，如果其 DODAG 父集的每個元素都屬於該 DODAG 版本，或者該節點是相應 DODAG 的根節點。
3. 節點不得為 DODAG 版本發送不屬於其成員的 DIO。
4. DODAG 根可以增加他們廣告的 DODAG 版本號，從而移動到新的 DODAG 版本。當 DODAG 根增加其 DODAG 版本號時，它必須遵循第 7 節中描述的序列號算術的約定。觸發 DODAG 版本號遞增的事件將在本節後面和第 18 節中描述。
5. 在給定的 DODAG 中，不是根的節點不得廣告高於它聽到的最高 DODAG 版本號。更高被定義為第 7 節中的大於運算符。
6. 一旦節點通過發送 DIO 廣告 DODAG 版本，它不得是同一 DODAG 的先前 DODAG 版本的成員(即，具有相同的 RPLInstanceID，相同的 DODAGID 和較低的 DODAG 版本號)。更小被定義為第 7 節中的小於運算符。

當一個非根節點的 DODAG 雙親為空時(即，最後一個父節點)被刪除，導致節點不再與該 DODAG 關聯)，則 DODAG 資訊不應

該被抑制，直到特定實現的本地計時器到期。在抑制「舊」DODAG 狀態之前的間隔期間，如果出現任何新父節點，將能夠觀察到節點的 DODAG 版本號遞增。這將有助於防止在該節點無意中在自己先前的 Sub-DODAG，重新加入舊 DODAG 版本時可能發生的循環。

隨著 DODAG 版本號遞增，新的 DODAG 版本從 DODAG 根向外擴充。廣告新 DODAG 版本號的父節點，不能屬於廣告舊 DODAG 版本號 Sub-DODAG 的節點。因此節點可以安全地添加具有較新 DODAG 版本號的任何秩數的父節點，而不形成循環。

例如，假設一個節點離開 DODAG 版本號 N 的 DODAG。假設一個節點有一個 Sub-DODAG，並試圖通過廣告一個 INFINITE_RANK 秩數來毒害該 Sub-DODAG，但這些廣告可能已經在 LLN 中丟失。然後，如果節點確實觀察到候選鄰居在 DODAG 版本號 N，且在原始 DODAG 中廣告該位置，則該候選鄰居已經在該節點的前 Sub-DODAG 中，並且可以存在將該候選鄰居添加為父節點的情況導致循環。在這種情況下，如果觀察到該候選鄰居廣告 DODAG 版本號為 N+1，則該候選鄰居肯定是安全的，因為它確定不在該原始節點的 Sub-DODAG 中，它已經在聽到從原始 DODAG 根節點分離時，增加 DODAG 版本號通過。因此分離節點可以記住原始 DODAG 資訊，包括 DODAG 版本號 N。

確切地說，當 DODAG 根增量時 DODAG 版本號依賴於實現，已超出本規範的範圍。示例包括在管理干預時定期遞增 DODAG 版本號，或者在應用程序級別檢測丟失的連接或 DODAG 低效率時遞增 DODAG 版本號。

在節點轉換到並廣告新的 DODAG 版本之後，上述規則使其無法在其承諾廣告新的 DODAG 版本之後廣告先前的 DODAG 版本 (之前的 DODAG 版本號)。

8.2.2.2 DODAG 根

1. 無法滿足應用程序定義目標的 DODAG 根不得設置接地位元。

2. DODAG 根必須公佈 ROOT_RANK 秩數。
3. DODAG 父集為空的節點可以成為浮動 DODAG 的 DODAG 根。它也可以設置它的 DAG 優選，使其較少優選。

在使用非 LLN 鏈結聯合多個 LLN 根的部署中，可以在這些非 RPL 鏈結上運行 RPL，並使用一個路由器作為「骨幹根」。骨幹根是 DODAG 的虛擬根，並在骨幹上公開出 BASE_RANK 秩數。所有 LLN 根的父節點皆為骨幹根，若骨幹根也是 LLN 根，就包括骨幹根本身，公開 ROOT_RANK 的秩數給 LLN。這些虛擬根是同一個 DODAG 的一部分，並廣告相同的 DODAGID。它們通過骨幹網上的虛擬根協調 DODAG 版本號和其他 DODAG 參數。協調方法超出本規範的範圍(將在未來的配套規範中定義)。

8.2.2.3 DODAG 選擇

目標函數和廣告路由度量和 DAG 約束的集合決定節點如何選擇其鄰居集、父集和優選父節點。該選擇隱式地決定 DAG 內的 DODAG。這種選擇可以包括管理優選(Prf)以及度量或其他考慮因素。

如果節點具有加入更優選的 DODAG，同時仍然滿足其他優化目標的選項，則該節點通常將尋求加入由 OF 確定的更優選的 DODAG。在其他條件相同的情況下，由實現來確定哪個 DODAG 是最優選的(因為作為提醒，在每個 RPL 實例中節點只能加入一個 DODAG)。

8.2.2.4 DODAG 版本中的秩數和移動

1. 節點不得在 DODAG 版本中廣告小於或等於其父集的任何成員的秩數。
2. 節點可以在 DODAG 版本中廣告低於其先前廣告的秩數。
3. 設 L 是給定節點廣告的 DODAG 版本中的最低秩數。在同一個 DODAG 版本中，該節點不得廣告高於 $L +$

DAGMaxRankIncrease 的有效秩數。INFINITE_RANK 是此規則的一個例外：節點可以在沒有限制的情況下，在 DODAG 版本中公佈 INFINITE_RANK。如果一個節點的秩數高於 $L + \text{DAGMaxRankIncrease}$ 允許的秩數，那麼當它做為秩數廣告時，它必須將其秩數作為 INFINITE_RANK 廣告。

4. 節點可以隨時選擇加入 RPL 實例中的不同 DODAG。這樣的連接沒有秩數限制，除非不同的 DODAG 是此節點先前已成為其成員的 DODAG 版本；在這種情況下，必須遵守前一個項目(3)的規則。在節點發送表示其新 DODAG 成員資格的 DIO 之前，它必須沿前一個 DODAG 轉發封包。
5. 節點可以在聽到合適的 DODAG 父母廣告下一個 DODAG 版本號之後的任何時間選擇遷移到 DODAG 內的下一個 DODAG 版本。

從概念上講，實現是在 DODAG 版本中維護 DODAG 父集。移動需要更改 DODAG 父集。向上移動不會出現產生循環的風險，但向下移動可以，因此操作受到其他約束。

當節點遷移到下一個 DODAG 版本時，需要為新版本重建 DODAG 父集。實施可以推遲遷移一段合理的時間，以查看具有更好的指標但更高秩數的其他鄰居是否宣布自己。同樣，當一個節點跳到一個新的 DODAG 時，它需要為這個新的 DODAG 構建一個新的 DODAG 父集。

如果一個節點需要向下移動到它所連接的 DODAG，並增加它的秩數，那麼它可以毒化它的路由，並在移動之前延遲，如第 8.2.2.5 節所述。

允許節點加入任何從未成為先前成員的 DODAG 版本，且沒有任何限制，但如果該節點是 DODAG 版本的先前成員，則必須繼續遵守在 DODAG 版本的壽命中的任何一點，都不能廣告高於 $L + \text{DAGMaxRankIncrease}$ 秩數的規則。必須遵守此規則，以免創建一個漏洞，讓節點有效地將其秩數一直遞增到 INFINITE_RANK，這會影響其他節點，並造成資源浪費的計數到無窮大的情況。

8.2.2.5 毒化

1. 節點通過廣告 INFINITE_RANK 秩數來毒化路由。
2. 節點不得在其父集中具有任何具有 INFINITE_RANK 秩數的節點。

雖然實現可以出於中毒的目的廣告 INFINITE_RANK，但這樣做與將秩數設置為 INFINITE_RANK 不同。例如，節點可以繼續發送其 RPL 封包資訊，包括不是 INFINITE_RANK 的秩數，但仍然在 DIO 中廣告 INFINITE_RANK 的資料封包

當觀察到(舊)父節點廣告 INFINITE_RANK 的秩數時，該(舊)父節點已從 DODAG 分離並且不再能夠充當父節點，也沒有任何方式可以認為另一個節點具有排名大於 INFINITE_RANK。因此該(舊)父節點不能再作為父節點，而是從父節點中刪除。

8.2.2.6 分離

1. 節點無法在給定的 DODAG 版本中保持與 DODAG 的連接，即在不違反本規範規則的情況下不能保留非空父集，可以從該 DODAG 版本中分離。分離的節點成為其自己的浮動 DODAG 的根，並且應該立即在 DIO 中宣告這種新情況作為中毒的替代方案。

8.2.2.7 跟隨父節點

1. 如果節點從其 DODAG 父節點之一接收到 DIO，表示父節點已離開 DODAG，則該節點應盡可能通過備用 DODAG 父節點保留在其當前 DODAG 中。它可以跟隨離開的父節點。

DODAG 父節點可以是已移動的，遷移到下一個 DODAG 版本，或跳到其他 DODAG。節點應該優先保留在當前 DODAG 中，如果可以的話通過替代父節點，但如果沒有其他選項則應該跟隨父節點。

8.2.3. DIO 訊息通信

當接收到 DIO 訊息時，接收節點必須首先確定是否應該接受 DIO 訊息以進行進一步處理，並且如果符合條件，則隨後呈現 DIO 訊息以進行進一步處理。

1. 如果 DIO 訊息格式錯誤，則 DIO 訊息不符合進一步處理的條件，並且節點必須以靜默方式丟棄它。(有關錯誤記錄，請參閱第 18 節)。
2. 如果 DIO 訊息的發送端是候選鄰居集的成員且 DIO 訊息沒有格式錯誤，則節點必須處理 DIO。

8.2.3.1 DIO 訊息處理

當從候選鄰居接收到 DIO 訊息時，可以通過遵循第 8.2 節中描述的 DODAG 發現規則，將鄰居提升為 DODAG 父節點。當節點將鄰居放入 DODAG 父節點集時，該節點將通過新的 DODAG 父節點附加到 DODAG。

應該使用最優選的父節點來限制哪些其他節點可以成為 DODAG 父節點。DODAG 父集中的某些節點的秩數可以小於或等於最優選的 DODAG 父節點。(例如，如果能量受限的設備處於較低的秩數但應該根據優化目標避免，則可以發生這種情況，從而導致更優選的父節點處於更高的秩數。)

8.3. DIO 傳輸

RPL 節點使用涓流計時器[RFC6206]傳輸 DIO。來自發送端的 DIO，其 DAG 秩數較小，不會導致對接收端的父集，優選父節點或秩數的更改應被視為與涓流計時器一致。

以下封包和事件必須被認為與涓流計時器不一致，並導致涓流計時器重置：

- 當轉發封包時節點檢測到不一致，如第 11.2 節中所述。

- 當節點收到沒有請求資訊選項的多播 DIS 訊息時，除非 DIS 旗標限制此行為。
- 當節點收到帶有請求資訊選項的多播 DIS，且該節點與請求資訊選項中的所有述詞匹配時，除非 DIS 旗標限制此行為。
- 當節點加入新的 DODAG 版本時(例如，通過更新其 DODAG 版本號，加入新的 RPL 實例等)。

請注意，此列表並非詳盡無遺，並且實現可以將其他訊息或事件視為不一致。

節點不應重置其 DIO 涓流定時器以回應單播 DIS 訊息。當節點收到沒有請求資訊選項的單播 DIS 時，它必須將 DIO 單播到發送端作為回應。這個 DIO 必須包含 DODAG 配置選項。當節點收到帶有請求資訊選項的單播 DIS 訊息並匹配該請求資訊選項的述詞時，它必須將 DIO 單播發送給發送端作為回應。這個單播 DIO 必須包含一個 DODAG 配置選項。因此，節點可以向潛在的 DODAG 父節點發送單播 DIS 訊息，以便探測 DODAG 配置和其他參數。

8.3.1. 涓流參數

涓流計時器的配置參數指定如下：

Imin: 從 DIO 訊息中學習為 $(2^{\text{DIOIntervalMin}})\text{ms}$ 。DIOIntervalMin 的預設值為 `DEFAULT_DIO_INTERVAL_MIN`。

Imax: 從 DIO 訊息中了解到 DIOIntervalDoublings。
DIOIntervalDoublings 的預設值為
`DEFAULT_DIO_INTERVAL_DOUBLINGS`。

k: 從 DIO 訊息中學習為 DIORedundancyConstant。
DIORedundancyConstant 的預設值為
`DEFAULT_DIO_REDUNDANCY_CONSTANT`。在 RPL
中，當 k 具有值 0x00 時，這將被視為 RPL 中無窮大的冗
餘常數，即，涓流從不抑制訊息。

8.4. DODAG 選擇

DODAG 選擇是實現和 OF 依賴。為了限制不穩定的移動，並且所有度量標準相等，節點應該保持其先前的選擇。此外，在有更穩定的選擇可用時，節點應該提供一種方法來過濾掉其可用性被檢測為波動的父節點。

當出於安全性或其他原因無法或優選連接到接地的 DODAG 時，分散的 DODAG 可以盡可能多地聚合到較大的 DODAG 中，以便允許 LLN 內的連接。

在將候選者視為 DODAG 父節點之前，節點應該驗證候選鄰居是否可以獲得雙向連接和足夠的鏈結質量。

8.5. 作為葉節點的操作

在某些情況下，RPL 節點可以僅作為葉節點附加到 DODAG。這種情況的一個示例是當節點不理解或不支援(策略)RPL 實例的 OF 或廣告的度量/約束時。如第 18.6 節中所述，與策略功能相關，節點可以將 DODAG 作為葉節點加入，也可以不加入 DODAG。如第 18.5 節所述，建議記錄故障。

葉節點不擴充 DODAG 連接；然而在一些情況下，葉節點可能仍然需要偶爾發送 DIO，特別是當葉節點可能不總是充當葉節點，且檢測到不一致時。

作為葉節點運行的節點必須遵守以下規則：

1. 它不能傳輸包含 DAG 度量容器的 DIO。
2. 它的 DIO 必須宣傳 INFINITE_RANK 的 DAG 秩數。
3. 它可以抑制 DIO 傳輸，除非由於在轉發封包時檢測到不一致，或回應單播 DIS 訊息而觸發 DIO 傳輸，在這種情況下不得禁止 DIO 傳輸。
4. 它可以按照 9.2 節的描述傳輸單播 DAO。

5. 它可以將多播 DAO 傳輸到「1 跳」鄰域，如第 9.10 節所述。

需要葉節點發送 DIO 的特定情況是，該葉節點是另一個 DODAG 的先前成員，而另一個節點轉發假定舊拓撲的訊息，從而觸發不一致。葉節點需要傳輸 DIO 以修復不一致性。請注意，由於 LLN 的有損性質，即使葉節點可能通過在成為葉節點之前在舊 DODAG 中廣告 INFINITE_RANK 秩數來樂觀地毒化其路由，該廣告可能已經丟失並且葉節點必須是能夠稍後發送 DIO 以修復不一致性。

在一般情況下，葉節點不得將自身廣告為路由器(即發送 DIO)。

8.6. 行政管理秩數

在某些情況下，根據節點的某些特定於實現的策略和屬性，調整節點公佈的秩數超出 OF 計算的秩數可能是有益的。例如，除非沒有其他選擇，否則具有有限電池的節點應該是葉節點，然後可以增加 OF 指定的秩數計算以公開誇大的秩數。

9. 下行路由

本節介紹 RPL 如何發現和維護下行路由。RPL 使用目標公佈物件(DAO)訊息構造和維護下行路由。下行路由支援 P2MP 流，從 DODAG 根到葉。下行路由也支援 P2P 流：P2P 訊息可以通過上行路由流向 DODAG 根(或共同祖先)，然後通過下行路由從 DODAG 根流向目的地。

該規範描述 RPL 實例可以選擇用於維護下行路由的兩種模式。在稱為「儲存」的第一種模式中，節點儲存其 Sub-DODAG 的下行路由表。儲存網路中的下行路由上的每一跳，檢查其路由表以決定下一跳。在稱為「非儲存」的第二種模式中，節點不儲存下行路由表。向下封包使用由 DODAG 根[RFC6554]填充的源路由進行路由。

RPL 允許對儲存和非儲存網路進行簡單的單跳 P2P 優化。節點可以將目的地為單跳鄰居的 P2P 分組直接發送到該節點。

9.1. 目的地廣告父母

為了建立下行路由，RPL 節點向上發送 DAO 訊息。這些 DAO 訊息的下一跳目的地稱為「DAO 父節點」。節點的 DAO 父節點的集合稱為「DAO 父節點集」。

1. 節點可以使用全 RPL 節點多播位址發送 DAO 訊息，這是一種提供單跳路由的優化。必須在傳輸多播 DAO 時清除 'K' 位。
2. 節點的 DAO 父集必須是其 DODAG 父集的子集。
3. 在儲存模式操作中，節點不得將單播 DAO 訊息發送到不是 DAO 父節點的節點。
4. 在儲存模式操作中，DAO 訊息的 IPv6 源和目標位址必須是鏈結本地位址。
5. 在非儲存模式操作中，節點不得將單播 DAO 訊息發送到不是 DODAG 根的節點。
6. 在非儲存模式操作中，DAO 訊息的 IPv6 源和目標位址必須是唯一本地或全域位址。

9.2. 下行路由發現和維護

目的地廣告可以被配置為完全禁用，或者在儲存或非儲存模式下操作，如在 DIO 訊息中的 MOP 中所報告的。

1. 加入 DODAG 的所有節點必須遵守根目錄中的 MOP 設置。不具有作為路由器完全參與的能力的節點(例如，與廣告 MOP 不匹配的節點)可以作為葉節點加入 DODAG。
2. 如果 MOP 為 0，表示沒有下行路由，節點必須不傳輸 DAO 訊息，且可以忽略 DAO 訊息。

3. 在非儲存模式下，DODAG 根應該儲存從 DAO 學習的目標的源路由表條目。DODAG 根必須能夠為從儲存的 DAO 中學習的目的地生成源路由。
4. 在儲存模式下，所有非根非葉節點必須儲存從 DAO 學習的目的地的路由表條目。

根據 MOP 欄位的定義，DODAG 可以具有幾種可能的操作模式之一。它不支援下行路由，它支援從 DODAG 根源通過源路由的下行路由，或者它支援通過網路內路由表的下行路由。

當通過 DODAG 根的源路由支援下行路由時，通常期望 DODAG 根儲存從 DAO 獲知的源路由資訊以構建源路由。如果 DODAG 根無法儲存某些資訊，則某些目標可能無法訪問。

當通過網內路由表支援下行路由時，也可以支援或不支援本規範中定義的多播操作，也如 MOP 欄位所示。

當通過網內路由表支援下行路由時，如本規範中所述，預期充當路由器的節點已被充分配置以保持所需的路由表狀態。如果充當路由器的節點無法保持完整路由表狀態，則路由狀態不完整，因此可能會丟棄訊息，並且可能會記錄故障(第 18.5 節)。RPL 的未來擴充可能會詳細闡述用於管理此案例的改進操作/行為。

在編寫本規範時，RPL 不支援混合模式操作，其中一些節點源路由和其他儲存路由表：RPL 的未來擴充可能支援這種操作模式。

9.2.1. 路徑順序的維護

對於與節點關聯(擁有)的每個目標，該節點負責發出 DAO 訊息以配置下行路由。這些 DAO 訊息中包含的目標+傳輸資訊隨後在 DODAG 上傳播。傳輸資訊選項中的路徑順序計數器用於表示新鮮度並更新陳舊的下行路由資訊，如第 7 節所述。

對於與節點相關聯的目標(由該節點擁有)，該節點必須遞增路徑順序計數器，並在以下情況下生成新的 DAO 訊息：

1. 路徑壽命將被更新(例如，刷新或無路徑)。
2. 要更改 DODAG 父位址子欄位列表。

對於與節點相關聯的目標，該節點可以遞增路徑順序計數器，並生成新的 DAO 訊息，以便刷新下行路由資訊。在儲存模式下，節點為其每個 DAO 父節點生成這樣的 DAO，以便啟用多路徑。同一目標同時生成的所有 DAO 必須與傳輸資訊中的相同路徑順序一起發送。

9.2.2. DAO 訊息的產生

節點可能在接收 DAO 訊息時發送 DAO 訊息，這是由於其 DAO 父集的更改，或回應另一個事件(如相關前綴生存期到期)。在接收 DAO 的情況下，DAO 訊息是「新」還是包含新資訊很重要。在非儲存模式中，節點接收的每個 DAO 訊息都是「新的」。在儲存模式下，如果 DAO 訊息滿足所包含目標的任何這些條件，則該訊息是「新的」：

1. 它有一個較新的路徑順序號，
2. 它有額外的路徑控制位元，或
3. 它是一個無路徑 DAO 訊息，它刪除前綴的最後一個下行路由。

如果該 DAO 訊息不是新的，則從其 Sub-DODAG 接收 DAO 訊息的節點可以禁止調度 DAO 訊息傳輸。

9.3. DAO 基本規則

1. 如果節點發送的 DAO 訊息具有比先前 DAO 訊息傳輸更新或不同的資訊，則它必須將 DAO 順序欄位增加至少一個。與先前的 DAO 訊息傳輸相同的 DAO 訊息傳輸可以增加 DAO 順序欄位。

2. DAO 訊息的 RPLInstanceID 和 DODAGID 欄位必須與節點父集的成員和它發送的 DIO 的值相同。
3. 節點可以在單播 DAO 訊息中設置 'K' 旗標以回應單播 DAO-ACK 以便確認該嘗試。
4. 接收具有 'K' 旗標設置的單播 DAO 訊息的節點應該應該用 DAO-ACK 進行回應。接收沒有設置 'K' 旗標的 DAO 訊息的節點可以用 DAO-ACK 回應，尤其是報告錯誤情況。
5. 在單播 DAO 訊息中設置 'K' 旗標但在回應中沒有接收到 DAO-ACK 的節點可以重新安排 DAO 訊息傳輸以進行另一次嘗試，直到實現特定的重試次數。
6. 節點應該忽略沒有更新序號的 DAO，並且不得進一步處理它們。

與 DIO 的版本欄位不同，DIO 僅由 DODAG 根增加並且由其他節點重複，DAO 順序值對每個節點都是唯一的。單播和多播 DAO 訊息的序號空間可以相同也可以不同。建議使用相同的序號空間。

9.4. DAO 訊息的結構

DAO 在儲存和非儲存網路中遵循共同的結構。在最一般的形式中，DAO 訊息可以包括若干組選項，其中每個組包括一個或多個目標選項，後跟一個或多個傳輸資訊選項。

整組傳輸資訊選項適用於整個目標選項組。後面的部分描述每種操作模式的更多細節。

1. RPL 節點必須在它們傳輸的每個 DAO 訊息中包含一個或多個 RPL 目標選項。如果該節點需要 DODAG 向該節點提供下行路由，則一個 RPL 目標選項必須具有包含節點的 IPv6 位址的前綴。RPL 目標選項可以緊跟一個不透明的 RPL 目標描述符選項，該選項符合它的要求。

2. 當節點更新覆蓋其中一個位址的目標選項的傳輸資訊選項中的資訊時，它必須增加該傳輸資訊選項中的「路徑順序」號。路徑順序號可能偶爾遞增以刷新下行路由。
3. 單播 DAO 訊息中的一個或多個 RPL 目標選項必須後跟一個或多個傳輸資訊選項。所有轉接選項都適用於緊接在它們之前的所有目標選項。
4. 多播 DAO 不得在傳輸資訊選項中包含 DODAG 父節點位址子欄位。
5. 接收並處理包含特定目標資訊的 DAO 訊息的節點，該節點具有該目標的先驗資訊，必須使用與該目標相關聯的傳輸資訊選項中的路徑順序號，以確定是否 DAO 訊息包含第 7 節中的更新資訊。
6. 如果節點收到不符合上述規則的 DAO 訊息，它必須丟棄 DAO 訊息而不進行進一步處理。

在非儲存模式下，根通過遞歸查找將目標(位址或前綴)和傳輸位址綁定在一起的單跳資訊，逐跳構建嚴格的源路由頭。在某些情況下，當子位址是從父母擁有和公佈的前綴派生時，可以由根推斷該父子關係以構造源路由頭。在所有其他情況下，有必要從可達目標通知傳輸目標關係的根，以便稍後啟用路由頭的遞歸構造。在 DAO 訊息中作為目的地廣告的位址必須位於同一路由器中，或者由路由器在鏈結上可達擁有相關運輸資訊中表示的位址。以下附加規則適用於確保端到端源路由路徑的連續性：

1. 傳輸選項中使用的父節點的位址必須取自該父節點的 PIO，並設置'R'旗標。PIO 中的'R'旗標表示前綴欄位實際上包含完整的父位址，但子項不應該假設父位址在鏈結上。
2. 設置'A'旗標的 PIO 表示 RPL 子節點可以使用該前綴來自動配置位址。在 PIO 中使用'A'旗標設置前綴的父節點務必確保通過將其作為 DAO 目的地廣告，可以從根節點到達 PIO 中的位址或整個前綴。如果父節點還設置表示前綴在鏈結上的'L'旗標，那麼它必須在 DAO 訊息中將整個前綴作為目的地廣告。

如果'L'旗標被清除並且'R'旗標被設置，表明父節點在 PIO 中提供它自己的位址，那麼父必須將該位址作為 DAO 目的地廣告。

3. 在 DAO 訊息中廣告為目標的位址必須位於同一路由器中，或者由擁有相關傳輸資訊中表示的位址的路由器在鏈結上可達。
4. 為了實現路由頭的最佳壓縮，父應該在所有 PIO 中設置'R'旗標，並設置'A'旗標並清除'L'旗標，並且孩子應該更喜歡用作傳輸在 PIO 中找到的父節點位址，用於自動配置在 DAO 訊息中廣告為目標的位址。
5. 路由器可能具有未知為父節點鏈結的目標，因為它們是位於備用介面上的位址，或者因為它們屬於 RPL 外部的節點，例如連接的主機。為了在 RPL 網路中註入這樣的目標，路由器必須使用該節點 DAO 父節點的鏈結位址，在該目標的傳輸資訊選項中將其自身宣告為 DODAG 父節點位址子欄位。如果目標屬於外部節點，則路由器必須在傳輸資訊中設置外部的'E'旗標。

已經從設置'L'旗標的父 PIO 自動配置位址的子節點不需要將該位址廣告為 DAO 目標，因為父節點確保整個前綴已經從根可以到達。但是，如果未設置'L'旗標，則在非儲存模式下，子節點必須使用父可達的位址通知父子關係的根，以便能夠遞歸構建路由。這是通過將父節點移動的位址與作為 DAO 訊息中的目標的子位址相關聯來完成的。

9.5. DAO 傳輸調度

由於 DAO 向上流動，因此接收單播 DAO 可以觸發向 DAO 父節點發送單播 DAO。

1. 在接收到具有更新資訊的單播 DAO 訊息時，例如包含具有新路徑順序的傳輸資訊選項，節點應該發送 DAO。它不應該立即發送這個 DAO 訊息。它應該延遲發送 DAO 訊息，以便聚合來自其作為 DAO 父節點的其他節點的 DAO 資訊。

2. 節點應該延遲發送帶有定時器(延遲 DAO)的 DAO 訊息。接收 DAO 訊息將啟動延遲 DAO 計時器。在延遲 DAO 定時器處於活動狀態時收到的 DAO 訊息不會重置定時器。當延遲 DAO 計時器到期時，節點發送 DAO。
3. 當節點將節點添加到其 DAO 父集時，它應該安排 DAO 訊息傳輸。

延遲 DAO 的值和計算取決於實現。在此規範中定義預設值 `DEFAULT_DAO_DELAY`。

9.6. 觸發 DAO 訊息

節點可以觸發其 Sub-DODAG 發送 DAO 訊息。每個節點都維護一個 DAO 觸發序列號(DTSN)，它通過 DIO 訊息進行通信。

1. 如果節點聽到其中一個 DAO 父節點遞增其 DTSN，則節點必須使用 9.3 節和 9.5 節中的規則調度 DAO 訊息傳輸。
2. 在非儲存模式下，如果節點聽到其中一個 DAO 父節點遞增其 DTSN，則節點必須遞增其自己的 DTSN。

在儲存操作模式中，作為常式路由表更新和維護的一部分，儲存節點可以遞增 DTSN，以便可靠地從其直接子節點觸發一組 DAO 更新。

在儲存操作模式中，不必從整個 Sub-DODAG 觸發 DAO 更新，因為該狀態資訊將逐跳傳播到 DODAG。

在非儲存操作模式中，DTSN 增量還將使節點的直接子節點依次遞增其 DTSN，從整個 Sub-DODAG 觸發一組 DAO 更新。通常，在非儲存操作模式中，當需要 DAO 刷新時，只有根將獨立地遞增 DTSN，但是不希望進行全域修復(例如通過遞增 DODAG 版本號)。通常，在非儲存操作模式中，所有非根節點僅在觀察到它們的父節點時才增加它們的 DTSN。

通常，節點可以根據特定於實現的邏輯觸發 DAO 更新，例如基於檢測到下行路由不一致或偶爾基於內部計時器。

在儲存網路中，為觸發的 DAO 選擇合適的延遲 DAO 可以大大減少傳輸的 DAO 數量。觸發器流向 DODAG；在最好的情況下，DAO 向上流動 DODAG，使得首先發送 DAO，每個節點僅發送一次 DAO 訊息。可以通過將延遲 DAO 與秩數成反比來設置這種調度。請注意，此建議旨在作為允許有效聚合的優化(在一般情況下，不需要正確操作)。

9.7. 非儲存模式

在非儲存模式下，RPL 使用 IP 源路由下行路由訊息。以下規則適用於處於非儲存模式的節點。儲存模式有一組單獨的規則，如第 9.8 節所述。

1. 傳輸資訊選項的 DODAG 父節點位址子欄位必須包含一個或多個位址。所有這些位址必須是發送端的 DAO 父母的位址。
2. DAO 沿著作為父選擇的一部分安裝的預設路由直接發送到根。
3. 當節點從其 DAO 父集中刪除節點時，它可以生成帶有更新的傳輸資訊選項的新 DAO 訊息。

在非儲存模式下，節點使用 DAO 將其 DAO 父節點報告給 DODAG 根。DODAG 根可以通過使用路由中每個節點的 DAO 父集來將下行路由拼接到節點。路徑順序資訊可用於檢測陳舊的 DAO 資訊。此每跳路由計算的目的是在 DAO 父節點更改時最小化流量。如果節點報告完整的源路由，則在 DAO 父更改上，整個 Sub-DODAG 必須將新 DAO 發送到 DODAG 根。因此，在非儲存模式下，節點可以發送單個 DAO，儘管它可能選擇向多個 DAO 父節點中的每一個發送多個 DAO 訊息。

節點通過發送帶有多個 RPL 目標選項的單個 DAO 訊息來打包 DAO。每個 RPL 目標選項都有自己的，緊隨其後的傳輸資訊選項。

9.8. 儲存模式

在儲存模式下，RPL 通過 IPv6 目標位址下行路由訊息。以下規則適用於處於儲存模式的節點：

1. 傳輸資訊選項的 DODAG 父位址子欄位必須為空。
2. 在接收單播 DAO 時，節點必須計算 DAO 是否會改變節點本身廣告的前綴集。該計算應該包括在與 DAO 相關聯的傳輸資訊選項中查詢路徑順序資訊，以確定 DAO 訊息是否包含取代已經儲存在節點處的資訊的更新資訊。如果是這樣，節點必須按照第 9.5 節中的規則生成新的 DAO 訊息並發送它。這種改變包括接收無路徑 DAO。
3. 當一個節點生成一個新的 DAO 時，它應該將它單播到它的每個 DAO 父節點。它不得將 DAO 訊息單播到不是 DAO 父節點的節點。
4. 當節點從其 DAO 父集中刪除節點時，它應該向該已刪除的 DAO 父節點發送無路徑 DAO 訊息(第 6.4.3 節)以使現有路由無效。
5. 如果到廣告的向下位址的訊息遭受轉發錯誤，鄰居不可到達檢測(NUD)或類似的故障，則節點可以將該位址標記為不可達並生成適當的無路徑 DAO。

DAO 廣告節點具有路由的目標位址和前綴。與非儲存模式不同，這些 DAO 不會傳遞有關路由本身的資訊：該資訊儲存在網路中，並且隱含在 IPv6 源位址中。當儲存節點生成 DAO 時，它使用已收到的 DAO 儲存狀態來生成一組 RPL 目標選項及其關聯的傳輸資訊選項。

由於此資訊儲存在每個節點的路由表中，因此在儲存模式下，DAO 直接與儲存此資訊的 DAO 父節點通信。

9.9. 路徑控制

來自節點的 DAO 訊息包含一個或多個目標選項。每個目標選項指定節點廣告的前綴，LLN 外部可到達的位址前綴，節點的 Sub-DODAG 中的目的地位址，或 Sub-DODAG 中的節點正在偵聽的多播組。傳輸資訊選項的路徑控制欄位允許節點請求或允許多個下行路由。節點構造傳輸資訊選項的路徑控制欄位，如下所示：

1. 路徑控制欄位的位元寬度必須等於值($PCS+1$)，其中 PCS 在 DODAG 配置選項的控制欄位中指定。大於或等於該值($PCS+1$)的位必須在傳輸時清除，並且必須在接收時忽略。低於該值的位被認為是「有效」位。
2. 節點必須在填充路徑控制欄位時邏輯上構建其 DAO 父節點的分組，其中每個組由具有相同優先級的 DAO 父節點組成。然後必須根據偏好對這些組進行排序，這允許將 DAO 父節點邏輯映射到路徑控制子欄位(參見圖 27)。可以重複組以便在補丁控制欄位的整個位寬上進行擴充，但是必須保留包括重複組的順序，以便正確地傳達優先級。
3. 對於描述節點自己的位址或 LLN 外部的前綴的 RPL 目標選項，必須設置路徑控制欄位的至少一個有效位。可以設置路徑控制欄位的更多有效位。
4. 如果節點接收到具有相同 RPL 目標選項的多個 DAO，則它必須按位或者接收它所接收的路徑控制欄位。此聚合按位 OR 表示前綴請求的下行路由的數量。
5. 當節點向其 DAO 父節點之一發送 DAO 訊息時，它必須選擇一個或多個在子欄位中設置為活動的位，這些位映射到聚合路徑控制欄位中包含該 DAO 父節點的組。給定位只能表示為對一個父節點有效。它發送給其父節點的 DAO 訊息必須設置這些有效位，並清除所有其他有效位元。
6. 對於 RPL 目標選項和 DAO 順序編號，節點發送給不同 DAO 父節點的 DAO 必須具有不相交的活動路徑控制位集。節點不能將 DAO 上的相同活動位設置為兩個不同的 DAO 父節點。

7. 路徑控制位應該根據 DAO 父節點對路徑控制子欄位的偏好映射進行分配，以便屬於特定路徑控制子欄位的活動路徑控制位或位分組被分配給組內的 DAO 父節點。已映射到該子欄位。
8. 在非儲存操作模式中，節點可以通過 DAO 而不在路徑控制欄位上執行任何進一步處理。
9. 節點不得單播路徑控制欄位集中沒有活動位的 DAO 訊息。對於給定的目標選項，節點可能沒有足夠的聚合路徑控制位來向其每個 DAO 父節點發送包含該目標的 DAO 訊息，在這種情況下，那些最不喜歡的 DAO 父節點可能無法獲得 DAO 訊息為該目標。

路徑控制欄位允許節點綁定將向其生成多少下行路由。它將路徑控制欄位中的多個位設置為等於它更喜歡的下行路由的最大數量。最多，每個位被發送到一個 DAO 父節點；位元簇可以發送到單個 DAO 父節點，以便在它自己的 DAO 父節點之間進行劃分。

為具有關聯路徑控制欄位的目標提供 DAO 路由的節點應該使用該路徑控制欄位的內容，以便確定該目標的多個備用 DAO 路由之間的優先順序。路徑控制欄位分配是從(DAO 父節點的)優選項派生的，這是根據此節點根據目標函數對向下方向的「端到端」聚合度量的最佳了解而確定的。在非儲存模式中，根可以通過聚合來自每個接收的 DAO 的資訊來確定下行路由，其中包括優選 DAO 父節點的路徑控制表示。

9.9.1. 路徑控制示例

假設在儲存模式下運行的 LLN 包含具有四個父節點 P1、P2、P3 和 P4 的節點 N。設 N 在其 Sub-DODAG 中有三個子節點 C1、C2 和 C3。設 PCS 為 7，這樣路徑控制欄位中將有 8 個有效位：1111111b。請考慮以下示例：

路徑控制欄位被分成四個子欄位 PC1(11000000b)、PC2(00110000b)、PC3(00001100b)和 PC4(00000011b)，使得這四個子欄位表示每個圖 27 的四個不同的優先級。節點處的實現在該示例中，N 組{P1，P2}彼此相同並且總體上是最優選的組。{P3}不如{P1，P2}優先，更優先選{P4}。然後讓節點 N 執行其路徑控制映射，以便：

{P1，P2} ->路徑控制欄位中的 PC1(11000000b)
{P3} ->路徑控制欄位中的 PC2(00110000b)
{P4} ->路徑控制欄位中的 PC3(00001100b)
{P4} ->路徑控制欄位中的 PC4(00000011b)

請注意，實現重複{P4}以完全覆蓋路徑控制欄位。

1. 讓 C1 發送包含具有路徑控制 10000000b 的目標 T 的 DAO。節點 N 儲存將 10000000b 與 C1 和目標 T 的路徑控制欄位相關聯的條目。
2. 讓 C2 發送包含具有路徑控制 00010000b 的目標 T 的 DAO。節點 N 儲存將 00010000b 與 C1 和目標 T 的路徑控制欄位相關聯的條目。
3. 讓 C3 發送包含具有路徑控制 00001100b 的目標 T 的 DAO。節點 N 儲存將 00001100b 與 C1 和目標 T 的路徑控制欄位相關聯的條目。
4. 在稍後的某個時間，節點 N 為目標 T 生成 DAO。節點 N 將通過對其為其提供 DAO 的每個子節點的貢獻進行 OR 運算來構造聚合路徑控制欄位。因此，聚合路徑控制欄位的活動位設置為：10011100b。
5. 然後，節點 N 在其父節點 P1、P2、P3 和 P4 之間分配聚合路徑控制位，以便準備 DAO 訊息。
6. P1 和 P2 有資格從最優選的子欄位(11000000b)接收有效位。這些位在聚合路徑控制欄位中是 10000000b。節點 N 必須僅將該位設置為兩個父節點之一。在這種情況下，節點 P1 被分

配該位並獲得其 DAO 的路徑控制欄位 10000000b。沒有剩餘的位元分配給節點 P2；因此，節點 P2 將具有 00000000b 的路徑控制欄位，並且由於沒有活動位，因此不能向節點 P2 生成 DAO。

7. 第二最優選的子欄位(00110000b)具有有效位 00010000b。節點 N 已將 P3 映射到此子欄位。節點 N 可以將活動位元分配給 P3，為包含目標 T 的 P3 構建 DAO，路徑控制為 00010000b。
8. 第三最優選的子欄位(00001100b)具有有效位 00001100b。節點 N 已將 P4 映射到該子欄位。節點 N 可以將兩個位元分配給 P4，為包含目標 T 的 P4 構建 DAO，路徑控制為 00001100b。
9. 最不優選的子欄位(00000011b)沒有有效位。如果存在有效位，則這些位將被添加到為 P4 構造的 DAO 的路徑控制欄位中。
10. 根據為這些目標收集的聚合路徑控制欄位，填充發往 P1、P2、P3、P4 的 DAO 訊息與其他目標(除 T 之外)的過程。

9.10. 多播目的地廣告訊息

與單播 DAO 操作不同的 DAO 操作的特殊情況是多播 DAO 操作，其可用於填充「1 跳」路由表條目。

1. 節點可以將 DAO 訊息多播到鏈結本地範圍所有 RPL 節點多播位址。
2. 多播 DAO 訊息必須僅用於廣告關於節點本身的資訊，即直接連接到節點或由節點擁有的前綴，例如節點訂閱的多播組或節點擁有的全域位址。
3. 多播 DAO 訊息不得用於中繼從另一節點學習的連接資訊(例如，通過單播 DAO)。
4. 節點不得對接收到的多播 DAO 訊息執行任何其他 DAO 相關處理；特別是，節點必須在收到多播 DAO 時不執行 DAO 父節點的操作。

- 多播 DAO 可用於啟用直接 P2P 通信，而無需 DODAG 中繼封包。

10. 安全機制

本節介紹安全 RPL 訊息的生成和處理。RPL 訊息編碼的高位識別 RPL 訊息是否安全。除了基本控制訊息(DIS、DIO、DAO、DAO-ACK)的安全版本之外，RPL 還有幾條訊息僅與啟用安全性的網路相關。

實施複雜性和規模是 LLN 的核心問題，因此在 RPL 實施中包含複雜的安全規定在經濟上或物理上都是不可能的。此外，許多部署可以利用鏈結層或其他安全機制來滿足其安全要求，而無需在 RPL 中使用安全性。

因此，本文件中描述的安全功能可以實現。給定的實現可以支援所描述的安全性特徵的子集(包括空集)，例如，它可以支援完整性和機密性，但不支援簽名。實現應該明確指出支援哪些安全機制，並且建議實施者仔細考慮安全要求和網路中安全機制的可用性。

10.1. 安全概述

RPL 支援三種安全模式：

- 不安全。在此安全模式下，RPL 使用基本的 DIS、DIO、DAO 和 DAO-ACK 訊息，這些訊息沒有安全性部分。由於網路可能正在使用其他安全機制，例如鍊路層安全性，因此不安全模式並不意味著在沒有任何保護的情況下發送所有訊息。
- 預安裝。在此安全模式下，RPL 使用安全訊息。要加入 RPL 實例，節點必須具有預安裝的密鑰。節點使用它來提供訊息機密性，完整性和真實性。節點可以使用此預安裝的密鑰將 RPL 網路加入主機或路由器。

- 認證。在此安全模式下，RPL 使用安全訊息。要加入 RPL 實例，節點必須具有預安裝的密鑰。節點使用此密鑰來提供訊息機密性，完整性和真實性。使用此預安裝的密鑰，節點可以僅作為主機加入網路。要將網路作為路由器加入，節點必須從密鑰授權機構獲取第二個密鑰。此密鑰授權機構可以在向其提供第二密鑰之前驗證請求者是否為路由器。對稱算法不支援經過身份驗證的模式。在編寫本規範時，RPL 僅支援對稱算法：包含經過身份驗證的模式，以利於潛在的未來加密原語。見 10.3 節。

RPL 實例是否使用不安全模式通過它是否使用安全 RPL 訊息來表示。安全網路是否使用預安裝或認證模式由 DAG 配置選項的'A'位發出信號。

該規範規定 CCM——具有 CBC-MAC(密碼塊鏈結 - 訊息認證碼)的計數器——作為 RPL 安全的加密基礎[RFC3610]。在本規範中，CCM 使用 AES-128 作為其底層加密算法。「安全性」部分中保留一些位，以便將來指定其他算法。

所有安全的 RPL 訊息都有 MAC 或簽名。可選地，安全的 RPL 訊息還具有用於機密性的加密保護。安全的 RPL 訊息格式支援集成的加密/認證方案(例如，CCM)以及單獨加密和認證分組的方案。

10.2. 加入安全網路

RPL 安全性假定希望加入安全網路的節點已預先配置有用於與鄰居和 RPL 根通信的共享密鑰。要加入安全的 RPL 網路，節點要不是通過發送安全的 DIS 來偵聽安全的 DIO，就是觸發安全的 DIO。除了第 8 節中的 DIO/DIS 規則外，安全 DIO 和 DIS 訊息還具有以下規則：

1. 如果發送，該初始安全 DIS 必須將密鑰標識符模式欄位設置為 0(00)並且必須將安全級別欄位設置為 1(001)。使用的密鑰必須是預先配置的組密鑰(密鑰索引 0x00)。
2. 當一個節點重置其 Trickle 定時器以回應安全 DIS(第 8.3 節)時，它發送的下一個 DIO 必須是一個安全 DIO，其安全配置

與安全 DIS 相同。如果節點在發送 DIO 之前接收到多個安全 DIS 訊息，則安全 DIO 必須具有與其回應的最後一個 DIS 相同的安全配置。

3. 當節點發送 DIO 以回應單播安全 DIS(第 8.3 節)時，DIO 必須是安全 DIO。

上述規則允許節點使用預配置的共享密鑰加入安全的 RPL 實例。一旦節點使用預配置的共享密鑰加入 DODAG，「配置」選項的'A'位元將確定其功能。如果清除配置選項的'A'位元，則節點可以使用此預安裝的共享密鑰正常交換訊息：它可以發出 DIO、DAO 等。

如果設置組態選項的'A'位元且 RPL 實例在認證模式下運行：

1. 在使用密鑰索引 0x00 保護的安全 DIO 中，節點不得在 INFINITE_RANK 之外廣告秩數。當處理用密鑰索引 0x00 保護的 DIO 訊息時，處理節點必須將廣告的秩數視為 INFINITE_RANK。任何其他值都會導致郵件被丟棄。
2. 使用密鑰索引 0x00 保護 DAO 不得有 RPL 目標選項，除了節點的位址之外還有前綴。如果節點使用預安裝的共享密鑰接收到安全的 DAO 訊息，其中 RPL 目標選項與 IPv6 源位址不匹配，則它必須丟棄安全的 DAO 訊息而不進行進一步處理。

上述規則意味著在設置'A'位的 RPL 實例中，使用密鑰索引 0x00，節點可以將 RPL 實例作為主機而不是路由器加入。節點必須與密鑰授權機構通信才能獲得使其能夠充當路由器的密鑰。

10.3. 安裝密鑰

經過身份驗證的模式需要一個可能的路由器，一旦它們作為主機加入網路，就會動態安裝新密鑰。作為主機加入後，該節點使用標準 IP 訊息傳遞與授權服務器通信，授權服務器可以提供新密鑰。

獲得此類密鑰的協定超出本規範的範圍，並在未來的規範中進行詳細說明。需要詳細說明 RPL 在認證模式下安全運行。

10.4. 一致性檢查

RPL 節點發送一致性檢查(CC)訊息以防止重複攻擊並同步計數器。

1. 如果節點收到'R'位被清除的單播 CC 訊息，並且它是加入相關 DODAG 的成員或正在加入相關 DODAG 的過程，則它應該向發送端回應單播 CC 訊息。該回應必須設置'R'位元，並且必須具有與其接收的訊息相同的 CC Nonce、RPLInstanceID 和 DODAGID 欄位。
2. 如果節點收到多播 CC 訊息，它必須丟棄該訊息而不進行進一步處理。

一致性檢查訊息允許節點發出質詢——回應以驗證節點的當前計數器值。由於 CC 隨機數是由挑戰者生成的，因此對手重複訊息不太可能生成正確的回應。一致性檢查回應中的計數器允許挑戰者驗證它聽到的計數器值。

10.5. 計數器

在最簡單的情況下，計數器值是無符號整數，節點在每個安全的 RPL 傳輸上遞增一個或多個。計數器可以表示具有以下屬性的時間戳：

1. 時間戳必須至少為六個八位元組。
2. 時間戳必須是 1024 Hz(二進制毫秒)粒度。
3. 時間戳開始時間必須是 1970 年 1 月 1 日，UTC 時間凌晨 00:00:00。
4. 如果計數器表示時間戳，則計數器值必須是如下計算的值。
設 T 為時間戳，S 為使用中密鑰的開始時間，E 為使用密鑰的

結束時間。S 和 E 都使用與上述時間戳相同的三個規則來表示。如果 $E > T < S$ ，則計數器無效，節點不得生成封包。否則，計數器值等於 $T - S$ 。

5. 如果計數器表示這樣的時間戳，則節點可以設置安全 RPL 包的安全區段的'T'旗標。
6. 如果計數器欄位沒有出現這樣的時間戳，那麼節點不能設置'T'旗標。
7. 如果節點沒有滿足上述要求的本地時間戳，它必須忽略'T'旗標。

如果節點支援這樣的時間戳並且它接收到設置'T'旗標的訊息，則它可以對第 10.7.1 節中描述的接收訊息應用時間檢查。如果一個節點收到沒有設置'T'旗標的訊息，它就不能應用這個時間檢查。出於應用原因，節點的安全策略可以包括拒絕未設置'T'旗標的所有訊息。

存在'T'旗標是因為當前許多 LLN 已經以亞毫秒粒度維護全域時間同步以用於安全性，應用和其他原因。允許 RPL 在存在時利用此現有功能大大簡化某些安全問題的解決方案，例如延遲保護。

10.6. 傳出封包的傳輸

給定傳出的 RPL 控制封包和所需的安全保護，本節描述 RPL 如何生成要傳輸的安全封包。它還描述加密操作的順序，以提供所需的保護。

安全保護的要求和應用於傳出 RPL 封包的安全級別應由節點的安全策略資料庫確定。用於傳出封包處理的此安全策略資料庫的配置是特定於實現的。

在要傳輸安全 RPL 訊息的情況下，RPL 節點必須在傳出 RPL 封包中設置安全區段(T, Sec, KIM 和 LVL)，以描述所應用的保護級別和安全設置(參見第 6.1 節)。必須設置 RPL 訊息編碼欄位的安全子欄位以表示安全 RPL 訊息。

用於構建 AES-128 CCM nonce(圖 31)以保護輸出封包的計數器值必須是傳輸到特定目標位址的最後一個計數器的增量。

在安全策略指定延遲保護的應用的情況下，用於構造 CCM 隨機數以保護輸出分組的時間戳計數器必須根據第 10.5 節中的規則遞增。在應用時間戳計數器的情況下(用 'T' 旗標設置表示)，本地維護的時間戳計數器必須作為發送的安全 RPL 訊息的一部分包括在內。

用於保護傳出封包的加密算法應由節點的安全策略數據庫指定，並且必須在傳出訊息中設置的 Sec 欄位的值中表示。

傳出封包的安全策略應確定適用的 KIM 和密鑰標識符，指定用於加密封包處理的安全密鑰，包括可選地使用簽名密鑰(參見第 6.1 節)。安全策略還將以身份驗證或身份驗證和加密的形式指定算法(算法)和保護級別(級別)，以及應用於傳出封包的簽名的潛在用途。

在應用加密的情況下，節點必須使用在封包的「安全性」部分中指定的安全保護，密鑰和 CCM 隨機數加密的有效負載替換原始封包有效負載。

所有安全的 RPL 訊息都包括完整性保護。結合安全算法處理，節點導出必須作為傳出的安全 RPL 分組的一部分包括的 MAC 或簽名。

10.7. 接收傳入封包

本節描述安全 RPL 封包的接收和處理。給定傳入的安全 RPL 封包，其中設置 RPL 訊息編碼欄位的安全子欄位位元，本節描述 RPL 如何生成封包的未加密變體並驗證其完整性。

接收器使用 RPL 安全控制欄位來確定必要的分組安全處理。如果所描述的訊息類型和發起者的安全級別未知或不符合本地維護的安全策略，則節點必須丟棄該封包而不進行進一步處理，可以提出管理警報，並且不得發送任何回應訊息。這些策略可以包括

安全級別，使用的密鑰，源標識符或缺少基於時間戳的計數器(由'T'旗標表示)。用於傳入封包處理的安全策略數據庫的配置超出本規範的範圍(例如，可以通過 DIO 配置或通過帶外管理路由配置來定義)。

在訊息安全級別(LVL)表示加密的 RPL 訊息的情況下，該節點使用通過 KIM 欄位識別的密鑰資訊以及 CCM 隨機數作為訊息有效負載解密處理的輸入。CCM 隨機數應來自訊息計數器欄位以及其他已接收和本地維護的資訊(參見第 10.9.1 節)。明文訊息內容應通過調用接收分組的 Sec 欄位指定的反向密碼操作模式獲得。

接收端應使用 CCM nonce 和已識別的密鑰資訊來檢查傳入封包的完整性。如果完整性檢查對接收到的 MAC 失敗，則節點必須丟棄該封包。

如果接收到的訊息具有初始化(零值)計數器值並且接收器具有當前為訊息的發起者維護的輸入計數器，則接收器必須通過發送一致性檢查回應訊息(參見第 6.6 節)來啟動計數器重新同步。訊息來源。應使用為特定節點位址維護的當前完整傳出計數器來保護一致性檢查回應訊息。該傳出計數器將包含在訊息的安全區段中，而傳入計數器將包含在一致性檢查訊息有效負載中。

根據指定的安全策略，節點可以為收到的 RPL 訊息應用重播保護。重播檢查應該在驗證接收到的封包之前執行。從輸入分組獲得的計數器應與為給定始發節點位址維護的輸入計數器的水印進行比較。如果接收的訊息計數器值非零並且小於保持的輸入計數器水印，則表示潛在的分組重複，並且節點必須丟棄輸入分組。

如果將延遲保護指定為傳入封包安全策略檢查的一部分，則使用時間戳計數器來驗證收到的 RPL 訊息的及時性。如果傳入訊息時間戳計數器值表示發起方位址的本地維護傳輸時間計數器之前的訊息傳輸時間，則表示重複違規並且節點必須丟棄傳入分組。如果收到的時間戳計數器值表示的訊息傳輸時間早於當前時間減去可接受的封包延遲，則表示延遲違規，並且節點必須丟棄傳入的封包。

一旦訊息被解密(如果適用)並且已成功通過其完整性檢查，重複檢查和可選的延遲保護檢查，該節點可以更新其本地安全資訊，例如源的預期計數器值以進行重複比較。

節點在收到未通過安全策略檢查或其他應用的完整性，重複或延遲檢查的訊息時，不得更新其安全資訊。

10.7.1. 時間戳密鑰檢查

如果設置訊息的'T'旗標並且節點具有遵循 10.5 節中的要求的本地時間戳，則節點可以檢查訊息的時間一致性。節點通過將計數器值添加到關聯密鑰的開始時間來計算訊息的傳輸時間。如果該傳輸時間超過密鑰的結束時間，則節點可以丟棄該訊息而無需進一步處理。如果傳輸時間在過去或將來與接收器上的本地時間相比太遠，它可以丟棄該訊息而無需進一步處理。

10.8. 覆蓋完整性和保密性

對於 RPL ICMPv6 訊息，整個封包都在 RPL 安全範圍內。

MAC 和簽名是在整個不安全的 IPv6 封包上計算的。在計算 MAC 和簽名時，可變 IPv6 欄位被認為是用零來填充，遵循 [RFC4302](IPsec Authenticated Header) 的第 3.3.3.1 節中的規則。在可以應用較低層的任何壓縮之前執行 MAC 和簽名計算。

當 RPL ICMPv6 訊息被加密時，加密從安全區段之後的第一個位元組開始，並繼續到封包的最後一個位元組。直到安全性部分末尾的 IPv6 標頭，ICMPv6 標頭和 RPL 訊息未加密，因為正確解密封包需要它們。

例如，發送 LVL=1，KIM=0 和 Algorithm=0 的訊息的節點使用 CCM 算法[RFC3610]創建具有屬性 ENC-MAC-32 的封包：它對封包進行加密並附加 32 位蘋果電腦。分組密碼密鑰由密鑰索引確定。CCM 隨機數的計算方法如第 10.9.1 節所述；要進行身份驗證和加密的訊息是從安全性部分之後的第一個位元組開始並以封包的最後一個位元組結束的 RPL 訊息。附加認證數據從 IPv6 標頭的開頭開始，以 RPL 安全區段的最後一個位元組結束。

10.9. 密碼操作模式

本說明書(算法=0)中描述的加密操作模式基於 CCM 和塊密碼 AES-128[RFC3610]。現有實現廣泛支援這種操作模式。CCM 模式需要 Nonce(CCM Nonce)。

10.9.1. CCM Nonce

RPL 節點構造 CCM Nonce，如下所示：

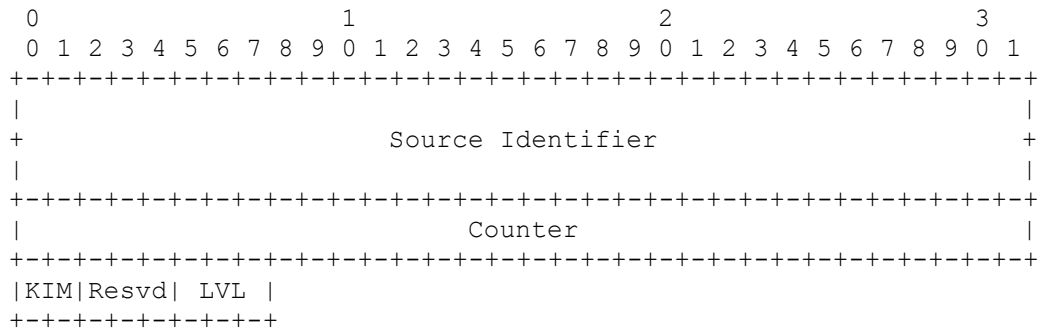


圖 31：CCM Nonce

源標識符：8 個位元組。源標識符設置為受保護封包的發起方的邏輯標識符。

計數器：4 個位元組。計數器設置為 RPL 控制訊息的「安全性」選項中相應欄位的(未壓縮)值。

密鑰標識符模式(KIM)：2 位。KIM 設置為 RPL 控制訊息的安全選項中相應欄位的值。

安全秩數(LVL)：3 位。安全級別設置為 RPL 控制訊息的「安全性」選項中相應欄位的值。

保留 CCM 隨機數的未分配位。在構造 CCM nonce 時，它們必須設置為零。

CCM 隨機數的所有欄位都表示在最重要的八位位組和最高位的第一位。

10.9.2. 簽名

如果 KIM 表示使用簽名(值為 3)，則節點將簽名附加到分組的數據有效載荷。安全級別(LVL)欄位描述此簽名的長度。安全模式 3 的 RPL 中的簽名方案是 RSA 算法(RSASSA-PSS)的實例化，如 [RFC3447] 的第 8.1 節中所定義。作為公鑰，它使用對(n,e)，其中 n 是 2048 位或 3072 位 RSA 模數，其中 $e=2^{16}+1$ 。它使用 CCM 模式[RFC3610]作為 M=0 的加密方案(作為流密碼)。請注意，雖然[RFC3610]不允許 M=0 的 CCM 模式，但 RPL 在與簽名結合使用時明確允許 M=0 的 CCM 模式，因為簽名提供足夠的數據驗證。這裡，M=0 的 CCM 模式在[RFC3610]中指定，但第 2.2 節中的'M'欄位必須設置為 0。它使用[FIPS180]第 6.2 節中指定的 SHA-256 散列函數。它使用[RFC3447]第 8.1 節的訊息編碼規則。

設'a'是計數器的 6 位元組表示和訊息頭的串聯。分組有效載荷是分組數據'm'和簽名's'的右連接。使用訊息部分 a 和 m 的右級連接來調用該簽名方案，而使用訊息部分 a 和 m 以及簽名 s 的右級連接來調用簽名驗證。

此表單的 RSA 簽名為 RPL 網路提供足夠的保護。如果需要，產生更簡潔簽名的替代簽名方案超出本規範的範圍，並且可能是未來規範的主題。

支援使用 2048 位或 3072 位簽名進行 RSA 簽名的實現應該支援驗證 2048 位和 3072 位 RSA 簽名。這是考慮為 RPL 部署提供升級路徑。

11. 封包轉發和循環避免/檢測

11.1. 封包轉發的建議

本文件指定路由協定。提供這些非規範性建議是為了通過說明這種實現如何與 RPL 一起工作來幫助設計轉發實現。

將封包轉發到目的地時，優先選擇下一跳後繼數，如下所示：

1. 此規範僅涵蓋如何從 DODAG 版本中選擇與正在轉發的封包的 IPv6 標頭中標記的 RPLInstanceID 相匹配的後繼。只要實施其他規則(例如嚴格排序實例和路由協定以防止循環),就可以在實例外部進行路由。這些規則可以在單獨的文件中定義。
2. 如果本地管理優選項支援從與 RPL 不同的路由協定中學習的路由,則使用該後繼路由器。
3. 如果封包標頭通過包含[RFC6554]中指定的 RH4 標頭指定源路由,則使用該路由。如果節點無法轉發具有指定源路由的封包,則應丟棄該封包。節點可以記錄錯誤。節點可以將源路由頭訊息中的 ICMPv6 錯誤發送到封包的源(參見第 20.18 節)。
4. 如果路由表中存在與從多播目的地廣告學習的目的地匹配的條目(例如,目的地是單跳鄰居),則使用該後繼者。
5. 如果路由表中存在與從單播目的地廣告學習的目的地匹配的條目(例如,目的地位於 Sub-DODAG 下),則使用該後繼。如果存在與多個後繼者相關聯的 DAO 路徑控制位,則在選擇時參考路徑控制位以按優先順序對後繼者進行排序。如果對於給定的 DAO 路徑控制位,多個後繼者被記錄為已斷言該位,則應優先考慮最近斷言該位的後繼者。
6. 如果有 DODAG 版本提供到與目標匹配的前綴的路由,則根據 OF 和路由度量選擇其中一個 DODAG 父節點作為後繼。
7. 當沒有更好的匹配時,可以選擇任何其他尚未嘗試的 DODAG 父節點用於下一次轉發單播分組的嘗試。
8. 最後,封包被丟棄。可以調用 ICMP 目的地不可達(檢測到不一致)。

根據[RFC2460]轉發時,跳數限制必須遞減。

請注意，所選擇的後繼者不能是作為封包前任的鄰居(水平分割)，除非用於將封包從向上方向改為向下方向的情況，如路由表所確定的那樣。進行更改的節點，例如當目的地接近時從 DIO 路由切換到 DAO 路由，以便繼續前往目的地。

11.2. 循環避免和檢測

RPL 循環避免機制保持簡單，旨在最大限度地減少客戶流失和狀態。出於多種原因可能形成循環，例如控制分組丟失。RPL 包括一種反應循環檢測技術，可以防止熔化並觸發損壞路徑的修復。RPL 循環檢測使用在數據分組內傳輸的 RPL 分組資訊，依賴於諸如[RFC6553]的外部機制，該機制將 RPL 封包資訊放置在 IPv6 逐跳選項報頭中。

RPL 包資訊的內容定義如下：

向下'O'：1 位元旗標，表示封包是預期向上還是向下進行。當封包預期進展為向下(使用 DAO 路由)時，路由器設置'O'旗標，並在轉發到 DODAG 根(向具有較低秩數的節點)時清除它。主機或 RPL 葉節點必須將'O'旗標設置為 0。

秩錯誤'R'：1 位元旗標，表示是否檢測到秩錯誤。當'O'位元中表示的相對秩和方向不匹配時，檢測到秩錯誤。主機或 RPL 葉節點必須將'R'位設置為 0。

轉發錯誤'F'：1 位元旗標，表示此節點無法將封包進一步轉發到目的地。'F'位元可能由子節點設置，該子節點沒有到設置向下'O'位元的封包的目的地路由。主機或 RPL 葉節點必須將'F'位設置為 0。

RPLInstanceID：8 位元欄，表示發送分組的 DODAG 實例。

傳送端秩數：源位設置為 0 的 16 位元欄和 RPL 網路內部轉發的路由器設置為 DAG 秩數(秩數)。

11.2.1. 源節點操作

如果源知道該分組優選的 RPLInstanceID，那麼它必須相應地設置與該分組相關聯的 RPLInstanceID 欄位；否則必須將其設置為 RPL_DEFAULT_INSTANCE。

11.2.2. 路由器操作

11.2.2.1 實例轉發

RPLInstanceID 由源與封包相關聯。此 RPLInstanceID 必須與任何節點(無論是主機還是路由器)放置封包的 RPL 實例相匹配。RPLInstanceID 是 RPL 分組資訊的一部分。

在 RPL 網路中轉發封包的 RPL 路由器務必檢查封包是否包含 RPL 封包資訊。如果不是，那麼 RPL 路由器必須插入 RPL 分組資訊。如果路由器是將封包注入 RPL 網路的入口路由器，則路由器必須在 RPL 封包資訊中設置 RPLInstanceID 欄位。路由器如何確定到 RPLInstanceID 的映射的詳細資訊超出本規範的範圍，並留待將來的規範。

在 RPL 網路外轉發封包的路由器必須刪除 RPL 封包資訊。

當路由器收到指定給定 RPLInstanceID 的封包並且該節點可以沿與該實例關聯的 DODAG 轉發封包時，路由器必須這樣做並保持 RPLInstanceID 值不變。

如果任何節點無法沿與 RPLInstanceID 關聯的 DODAG 轉發封包，則該節點應該丟棄該封包並發送 ICMP 錯誤訊息。

11.2.2.2 DAG 不一致性循環檢測

如果封包的方向與秩數關係不匹配，則 DODAG 不一致。如果接收端收到的封包中包含以下任何一種情況，接收端會檢測：

來自較高秩數的節點的'O'位設置(為向下)。

從較低秩數的節點清除(O)位的'O'位。

當 DODAG 根增加 DODAG 版本號時，可能在下一個 DODAG 版本和之前的 DODAG 版本之間形成臨時秩數不連續，特別是，如果節點正在調整其在下一個 DODAG 版本中的秩數並將其遷移推遲到下一個 DODAG 版本。仍然是先前 DODAG 版本的成員的路由器可以選擇將分組轉發到下一個 DODAG 版本中的(未來)父代。在某些情況下，這可能導致父母檢測到不一致，因為先前 DODAG 版本中的秩排序不一定與下一個 DODAG 版本中的排序相同，並且可以判斷該分組不是正向進展。如果發送路由器知道所選擇的後繼者已加入下一個 DODAG 版本，那麼發送路由器必須將傳送端秩數更新為 INFINITE_RANK，因為它將跨越不連續的封包轉發到下一個 DODAG 版本，以避免錯誤檢測到秩數不一致性。

路徑上的一個不一致性不被視為嚴重錯誤，並且封包可能會繼續。但是不應該沿著相同分組的路徑進行第二次檢測，並且必須丟棄分組。

此過程由與封包關聯的秩數錯誤位元控制。當在封包上檢測到不一致時，如果未設置秩數錯誤位元，則設置秩數錯誤位元。如果設置，必須丟棄封包並且必須重置涓流定時器。

11.2.2.3 DAO 不一致性檢測和恢復

DAO 不一致循環恢復是一種僅適用於儲存操作模式的機制。

在非儲存模式下，封包將源路由到目標，並且不會在本地更正 DAO 不一致性。而是將具有新編碼「源路由標頭中的錯誤」的 ICMP 錯誤發送回根。「源路由標頭中的錯誤」訊息具有與「目標無法到達訊息」相同的格式，如[RFC4443]中所指定。在 ICMP 訊息中發回的調用封包的部分應該至少記錄到路由頭，並且該節點應該使用路由頭，以便 IPv6 頭中的目標是該節點無法抵達的下一跳。

當路由器具有先前通過子節點從 DAO 訊息學習的下行路由時發生 DAO 不一致，但該下行路由在子節點中不再有效，例如，因為已清除該子節點中的相關狀態。通過 DAO 不一致循環恢復，可以使用封包以遞歸方式探索和清理 Sub-DODAG 上過時的 DAO 狀態。

一般來說，降落的封包永遠不會再次上升。如果應用 DAO 不一致循環恢復，那麼路由器應該將封包發送回傳遞它的父節點，並設置轉發錯誤 'F' 位元並且保持 'O' 位元不變。否則，路由器必須以靜默方式丟棄該封包。

收到設置轉發錯誤位的封包後，節點必須刪除導致轉發到該鄰居的路由狀態，清除轉發錯誤位，然後再次嘗試發送封包。在用戶可配置的特定於實現的定時器到期之後，可以將分組發送到備用鄰居。如果該備用鄰居通過該節點仍然具有不一致的 DAO 狀態，則該過程將遞歸，該節點將設置轉發錯誤 'F' 位元，並且還將清除備用鄰居中的路由狀態。

12. 多播操作

本節介紹 IPv6 RPL 網路上的多播路由操作，具體來說，單播 DAO 如何用於中繼組註冊。可以使用相同的 DODAG 構造來轉發單播和多播流量。本節僅限於如何交換組註冊以及轉發基礎架構如何運行的說明。它沒有提供 LLN 內的多播的完整描述，特別是沒有描述專門針對多播的 DODAG 的生成或者用於多播的 RPL 操作的細節——將是進一步規範的主題。

除了傳輸的位址類型之外，多播組註冊使用與單播相同的 DAO 訊息。主要區別在於下行的多播流量被複製到已向多播組註冊的所有子節點，而單播流量僅傳遞給一個子節點。

支援 RPL 儲存操作模式的節點應該也支援多播 DAO 操作，如下所述。僅支援非儲存操作模式的節點不支援此部分。

多播操作由 DIO 中的 MOP 欄位控制。

- 如果 MOP 欄位需要多播支援，則作為路由器加入 RPL 網路的節點必須按照本節中的描述進行操作，以便在 RPL 網路內進行多播發信號和轉發。不支援 MOP 欄位所需的多播操作的節點只能作為葉子加入。

- 如果 MOP 欄位不需要多播支援，則多播將通過超出此規範範圍的其他方式處理。(示例可能包括一系列單播副本或有限範圍的氾濫)。

路由器可能選擇僅將偵聽器註冊 DAO 訊息傳遞給其優選父節點；在這種情況下，如果傳輸在該鏈結上發生故障，則返回的所有 Sub-DODAG 的多播封包可能會丟失。或者，路由器可能會選擇複製其他父節點，就像它為廣告單播目的地的 DAO 訊息所做的那樣；在這種情況下，可能存在路由器需要修剪的重複項。

因此，在從偵聽器到 DODAG 根的路上，多播路由狀態安裝在每個路由器中，使根能夠將多播封包複製到已發出 DAO 訊息的所有子路由器，包括該多播組的目標選項。

對於源自 DODAG 內部的多播封包，封包將傳遞給優選父節點，如果失敗，則傳遞給 DODAG 中的備用節點。封包也會複製到所有已註冊的子節點，但傳遞封包的子節點除外。最後，如果外部基礎結構中有偵聽器，則 DODAG 根必須進一步將封包傳播到外部基礎結構中。

因此，DODAG 根充當 RPL 網路的自動代理集合點，並且作為在 RPL 域中啟動的所有多播流的非 RPL 域的源。因此，無論根是否實際連接到非 RPL 域，並且無論 DODAG 是接地還是浮動，根都可以始終為內部多播流提供服務。

13. 路由鄰接的維護

沿著 DODAG 沿著預設路徑向上選擇後繼路由，或者沿著 DODAG 沿目的地廣告向下學習的路徑，導致需要維護的路由鄰接的形成。

在 IGP 中，例如 OSPF[RFC4915]或 IS-IS [RFC5120]，路由鄰接的維護涉及使用保活機制(Hellos)或其他協定，如雙向轉發檢測(BFD)[RFC5881]和 MANET。鄰域發現協定(NHDP)[RFC6130]。遺憾的是，這種主動方法在受約束的環境中通常是不可取的，在這種環境中，由於資料流量會對鏈結負載和節點資源產生負面影響而導致過多的控制流量。

與那些路由協定相比，RPL 沒有定義任何保持機制來檢測路由鄰接故障：這是因為在許多情況下，這種機制在頻寬方面太昂貴，更重要的是，能源(電池供電)設備無法發送定期的保活)。仍然 RPL 需要外部機制來檢測鄰居不再可達。這種機制應該優先地對流量具有反應性，以便最小化維持路由鄰接的開銷並且集中於實際使用的鏈結。

可以使用的示例反應機制包括：

鄰居不可達性檢測[RFC4861]機制。

第 2 層觸發[RFC5184]派生自諸如關聯狀態和 L2 確認之類的事件。

14. 目標函數準則

目標函數(OF)與路由度量和約束相結合，允許選擇要加入的 DODAG，以及該 DODAG 中的多個對等體作為父物件。OF 用於計算父母的有序列表。OF 還負責計算 DODAG 版本中設備的秩數。

使用目標編碼點(OCP)在 DIO 訊息中表示目標函數，它表示必須用於構造 DODAG 的方法。目標編碼點在[RFC6552]和相關的配套規範中指定。

14.1. 目標函數行為

預期大多數目標函數在節點上遵循相同的抽象行為：

- 每當事件表示潛在的下一跳資訊被更新時，就觸發父選擇。這可能在接收到 DIO 訊息，計時器過去，所有 DODAG 父節點不可用或者表示候選鄰居的狀態已經改變的觸發時發生。
- OF 掃描節點上的所有介面。雖然在大多數應用場景中通常只有一個介面，但可能有多個介面，並且介面可能配置為可用於或不用於 RPL 操作。介面也可以使用優選項進行配置，或者

通過一些可能與鏈結層相關的啟發式方法動態學習為優於另一個介面，並且超出本規範的範圍。最後，介面可能匹配或不匹配目標函數的必需標準，例如，一定程度的安全性。結果，一些介面可能完全被排除在計算之外，例如，如果那些介面不能滿足某些廣告約束，而其他介面可能或多或少是優選的。

- OF 掃描可能介面上的所有候選鄰居，以檢查它們是否可以充當 DODAG 的路由器。可能有許多這樣的候選鄰居可能需要通過一些驗證測試才能使用它們。特別是，某些鏈結層需要使用路由器來體驗活動，以使路由器成為下一跳。
- OF 掃描可能介面上的所有候選鄰居，以檢查它們是否可以充當 DODAG 的路由器。可能有許多這樣的候選鄰居可能需要通過一些驗證測試才能使用它們。特別是，某些鏈結層需要使用路由器來體驗活動，以使路由器成為下一跳。

* 秩數的增加必須至少為最小跳躍秩數增加。

* 為了保持循環避免和度量優化的對齊，秩數的增加應該反映度量值的任何增加。例如，使用純粹的附加度量(例如 ETX)，可以使秩數的增加與度量的增加成比例。

* 將導致節點秩數增加的候選鄰居不被視為父選擇。

- 忽略廣告與策略函數指定的 OF 集不兼容的 OF 的候選鄰居。
- 當它掃描所有候選鄰居時，OF 保持當前最佳父節點並將其能力與當前候選鄰居進行比較。OF 定義許多對實現目標至關重要的測試。路由器之間的測試確定訂單關係。

* 如果路由器對於該關係是相等的，則嘗試在路由器之間進行下一次測試，

* 否則兩個路由器中最好的一個成為當前最好的父節點，掃描繼續下一個候選鄰居。

* 某些 OF 可能包含一個測試，用於比較節點加入任一路由器時可能產生的秩數。

- 掃描完成後，將選擇優選父節點，並將節點的秩數計算為優選父節點秩數加上該父節點的秩數級別。
- 可能需要進行其他輪次的掃描以選擇替代父母。在接下來的幾輪中：

* 忽略不在同一個 DODAG 中的候選鄰居。

* 忽略排名大於節點的候選鄰居。

* 父節點選擇忽略與節點秩數相同的候選鄰居。

* 優先選擇秩低於節點的候選鄰居。

15. 與鄰居發現互操作的建議

該規範直接從 IPv6 ND 借用前綴資訊選項(PIO)和路由資訊選項(RIO)。可以設想，隨著未來規範建立在此基礎上，可能還有其他原因可以利用 IPv6 ND 的部分內容。本節為將來的規範提供一些建議。

首先，RPL 是一種路由協定。在映射 RPL 和 ND 之間的功能時，應該非常謹慎地保留架構。RPL 僅用於路由。也就是說，可能存在說服技術原因以允許在特定實現/部署中在 RPL 和 IPv6 ND 之間共享選項。

一般而言，以下準則適用：

- 必須從 RPL 控制訊息選項註冊表中分配 RPL 類型編碼。
- RPL 長度欄位必須以單個八位元組為單位表示，而 ND 長度欄位則以 8 個八位元組為單位表示。
- 通常不要求 RPL 選項與 8 個八位元組邊界對齊。

- 在映射/轉置 IPv6 ND 選項以重新分發作為 RPL 選項時，應盡可能刪除任何填充八位元組。例如，PIO 中的前綴欄位欄位足以描述前綴欄位的長度。映射/轉置 RPL 選項以重新分發為 IPv6 ND 選項時，應恢復任何此類填充八位元組。此過程必須明確無誤。

16. 可互操作實施要求摘要

本節總結以三種主要模式之一運行的 RPL 實現的基本互操作性和參考規範性文本。預計實現不支援無下行路由，僅支援非儲存模式或僅支援儲存模式。第四種模式，作為葉子的操作也是可能的。

符合此規範的實現可以包含適合於應用場景的不同功能子集。實施者必須支援與應用場景所需的互操作性水平一致的水平。為此，可以在本說明書之外提供進一步的指導(例如，作為適用性陳述)，並且應當理解，在某些情況下，這種進一步的指導可以超越本說明書的部分。

16.1. 共同要求

在一般情況下，當 RPL LLN 中的所有節點合作使用相同的 MOP、OF、度量和約束時，可以實現最高級別的互操作性，並且因此能夠充當 RPL 路由器。當節點不能夠成為 RPL 路由器時，可以以更有限的方式作為 RPL 葉子進行互操作。

所有 RPL 實現都需要支援在封包內傳輸的 RPL 包資訊的使用(第 11.2 節)。[RFC6553]中描述一種這樣的機制。

RPL 實現需要支援使用鄰居不可達檢測(NUD)或等效機制來維護相鄰 RPL 節點的可達性(第 8.2.1 節)。替代機制可以針對實現的受約束能力進行優化，例如來自鏈結層的提示。

該規範提供獲得 PIO 並因此形成 IPv6 位址的手段。使用該機制時，可能需要通過外部進程執行位址解析和重複位址檢測，例如 IPv6 ND [RFC4861]或 6LoWPAN ND [6LoWPAN-ND]。

16.2. 作為 RPL 葉節點運行(僅限)

- 葉子節點(僅)的實現不會作為 RPL 路由器參與。葉節點的可互操作實現的行為如第 8.5 節所述。
- 不需要支援特定的 MOP 編碼，但是如果葉節點發送 DAO 訊息以建立下行路由，則葉節點應該以與 MOP 表示的操作模式一致的方式這樣做。
- 不需要支援特定的 OF。
- 總之，葉子節點通常不會發出 DIO 訊息，它可能會發出 DAO 和 DIS 訊息。葉節點接受 DIO 訊息，但它通常忽略 DAO 和 DIS 訊息。

16.3. 作為 RPL 路由器運行

如果沒有進一步的指導，那麼 RPL 路由器實現必須至少支援無度量 OF0 [RFC6552]。

為了保持一致的操作，RPL 路由器實現需要支援 DODAG 使用的 MOP。

所有 RPL 路由器都需要實現涓流[RFC6206]。

16.3.1. 支援上行路由(僅限)

僅支援上行路由的 RPL 路由器的實現支援以下內容：

- 上行路由(第 8 節)
- MOP 編碼 0(第 20.3 節)
- 總之，會發出 DIO 和 DIS 訊息，並且不會發出 DAO 訊息。接受 DIO 和 DIS 訊息，並忽略 DAO 訊息。

16.3.2. 在非儲存模式下支援上行路由和下行路由

在非儲存模式下支援上行路由和下行路由的 RPL 路由器的實現支援以下內容：

- 上行路由(第 8 節)
- 下行路由(非儲存)(第 9 節)
- MOP 編碼 1(第 20.3 節)
- 源路由下行流量([RFC6554])
- 總之，發出 DIO 和 DIS 訊息，並向 DODAG 根發出 DAO 訊息。接受 DIO 和 DIS 訊息，除 DODAG 根之外的節點忽略 DAO 訊息。通過本規範中描述的方法不支援多播，但可以通過某些替代方式支援多播。

16.3.3. 儲存模式下支援上行路由和下行路由

在儲存模式下支援上行路由和下行路由的 RPL 路由器的實現支援以下內容：

- 上行路由(第 8 節)
- 下行路由(儲存)(第 9 節)
- MOP 編碼 2(第 20.3 節)

總之發布 DIO、DIS 和 DAO 訊息。接受 DIO、DIS 和 DAO 訊息。通過本規範中描述的方法不支援多播，但可以通過某些替代方式支援多播。

16.3.3.1 支援基本多播方案選項

通過以下添加可以通過基本多播支援來增強儲存模式實現：

- 基本多播支援(第 12 節)

- MOP 編碼 3(第 20.3 節)

16.4. 未來規範的項目

許多項目留待將來的規範，包括但不限於以下內容：

- 如何連接非 RPL 節點(例如 IPv6 主機)，例如，將至少 PIO 材料始終如一地分發到附加節點。
- 如果使用認證模式，如何獲得支援的認證材料(第 10.3 節)。
- 多個同時實例的操作細節。
- 高級配置機制，例如 RPLInstanceID 的供應，目標函數的參數化以及控制安全性的參數。(預計此類機制可能會將 DIO 擴充為在 DODAG 中傳播資訊的手段)。

17. RPL 常量和變數

以下是 RPL 常量和變數的摘要：

BASE_RANK：這是可用於協調多個根的虛擬根的根。

BASE_RANK 的值為 0。

ROOT_RANK：這是 DODAG 根的秩數。ROOT_RANK 的值為

MinHopRankIncrease (由 DODAG 根公佈)，

DAGRank(ROOT_RANK)為 1。

INFINITE_RANK：這是秩數的常量最大值。INFINITE_RANK 的值為 0xFFFF。

RPL_DEFAULT_INSTANCE：這是此協定由沒有任何覆蓋策略的節點使用的 RPLInstanceID。RPL_DEFAULT_INSTANCE 的值為 0。

DEFAULT_PATH_CONTROL_SIZE：這是用於在 DODAG 配置選項中配置 PCS 的預設值，該選項表示傳輸資訊選項的

「路徑控制」欄位中的有效位數。

DEFAULT_PATH_CONTROL_SIZE 的值為 0。這將配置最簡單的情況，將扇出限制為 1 並限制節點僅向一個父節點發送 DAO 訊息。

DEFAULT_DIO_INTERVAL_MIN：這是用於為 DIO 涓流計時器配置 Imin 的預設值。DEFAULT_DIO_INTERVAL_MIN 的值為 3。此配置導致 Imin 為 8 ms。

DEFAULT_DIO_INTERVAL_DOUBLINGS：這是用於為 DIO 涓流計時器配置 Imax 的預設值。

DEFAULT_DIO_INTERVAL_DOUBLINGS 的值為 20。此配置的最大間隔為 2.3 小時。

DEFAULT_DIO_REDUNDANCY_CONSTANT：這是用於為 DIO 涓流計時器配置 k 的預設值。

DEFAULT_DIO_REDUNDANCY_CONSTANT 的值為 10。此配置是涓流抑制機制的保守值。

DEFAULT_MIN_HOP_RANK_INCREASE：這是 MinHopRankIncrease 的預設值。

DEFAULT_MIN_HOP_RANK_INCREASE 的值為 256。此配置導致秩數的 8 位寬整數部分。

DEFAULT_DAO_DELAY：這是延遲 DAO 計數器的預設值。

DEFAULT_DAO_DELAY 的值為 1 秒。見 9.5 節。

DIO 定時器：每個 DODAG 的一個實例，節點是其成員。到期觸發 DIO 訊息傳輸。在

$[0, \text{DIOIntervalMin}..2^{\text{DIOIntervalDoublings}]$ 中具有可變間隔的涓流計時器。見 8.3.1 節

DAG 版本增量計時器：每個 DODAG 最多一個實例，其節點作為 DODAG 根。可能不支援所有實現。到期觸發 DODAG 版本號的增量，導致發送一系列新的更新的 DIO 訊息。應根據 DODAG 的傳播時間選擇適當的間隔，並根據應用要求（例如，回應時間與開銷）進行選擇。

延遲 DAO 定時器：每個 DODAG 每個 DAO 父節點(選擇接收目的地廣告的 DODAG 父節點的子集)最多一個定時器。到期會觸發向 DAO 父節點發送 DAO 訊息。見 9.5 節

移除計時器：每個鄰居每個 DAO 條目最多一個計時器(即，作為 DODAG 父節點向該節點提供 DAO 訊息的那些鄰居)。如果沒有 DAO 父母，到期可以觸發無路徑廣告或立即解除分配 DAO 條目。

18. 可管理性考慮因素

本節的目的是考慮 RPL 的可管理性，以及 RPL 如何在 LLN 中運作。本節的範圍是根據[RFC5706]中提出的建議考慮可管理性的以下方面：協定的配置、監控、故障管理、計費和性能。

18.1. 介紹

大多數現有的 IETF 管理標準是 MIB 模塊(基於管理資訊結構(SMI)的數據模型)，用於監視和管理網路設備。

對於許多協定，IETF 社區使用 IETF 標準管理框架，包括簡單網路管理協定[RFC3410]，管理資訊結構[RFC2578]和用於管理新協定的 MIB 數據模型。

正如[RFC5706]中所指出的，操作和管理方面的通用策略已經擴充到對一組工具和管理協定更加開放的策略，而不是嚴格依賴於單個協定(如 SNMP)。

2003 年，網際網路架構委員會(IAB)舉辦網路管理研討會[RFC3535]，討論一些 IETF 網路管理協定的優缺點，並將其與營運需求進行比較，尤其是配置。

討論的一個問題是 SNMP[RFC3410]的二進制格式的用戶不友好性。對於 LLN，必須注意的是，在編寫本文時，CoRE 工作組正在積極致力於 LLN 中設備的資源管理。儘管如此，仍然認為本節提供有關如何部署，營運和管理 RPL 的重要指導。

如[RFC5706]中所述：

管理資訊模型應包括對可管理內容的討論，需要配置協定的哪些方面，允許的操作類型，可能發生的協定特定事件，可以計算哪些事件以及操作員的哪些事件應該通知。

以下各節將詳細討論這些方面。

RPL 將用於各種可能具有諸如內存從幾千位元組到幾百千位元組甚至兆位元組的資源的設備上。當內存受到高度約束時，可能無法滿足本節中列出的所有要求。仍然值得以詳盡的方式列出所有這些，然後實施者將根據設備上的可用資源確定哪些要求可以滿足。

18.2. 配置管理

本節討論配置管理，列出與配置管理相關的協定參數。

一些 RPL 參數是可選的。配置要求僅適用於所使用的選項。

18.2.1. 初始化模式

「網際網路的架構原則」[RFC1958]，第 3.8 節規定：「盡可能避免使用選項和參數。任何選項和參數都應動態配置或協商，而不是手動配置」。在 LLN 中尤其如此，其中設備的數量可能很大並且手動配置是不可行的。在 RPL 的設計中已經考慮到這一點，其中 DODAG 根為加入 DODAG 的設備提供許多參數，從而避免路由器上的繁瑣配置和錯誤配置的潛在來源(例如，涓流定時器的值等)。此外，RPL 實現應該允許配置其他 RPL 參數，本節將對此進行討論。

18.2.1.1 啟動時的 DIS 操作模式

首次啟動節點時：

1. 節點可以決定保持靜默，等待從感興趣的 DODAG 接收 DIO 訊息(廣告支援的 OF 和度量/約束)，並且在它加入 DODAG 之前不發送任何多播 DIO 訊息。
2. 節點可以決定發送一個或多個 DIS 訊息(可選地，請求特定 DODAG 的 DIO)作為附近 DODAG 的初始探測，並且在一些可配置的時間段之後在沒有 DIO 訊息的情況下，該節點可以決定根據浮動 DODAG 並開始發送多播 DIO 訊息。

RPL 實現應該允許配置上面列出的優選操作模式以及所需的參數(在第二種模式中：DIS 訊息的數量和相關的定時器)。

18.2.2. DIO 和 DAO 基本訊息和選項配置

RPL 考慮將要使用的大範圍應用，指定許多協定參數。也就是說，特別注意限制必須在每個 RPL 路由器上配置的這些參數的數量。相反，可以使用許多預設值，並且在需要時，這些參數可以由 DODAG 根提供，從而允許動態參數設置。

RPL 實現應該允許配置以下路由協定參數。如上所述，請注意在 DODAG 根上配置大量參數。

18.2.3. LLN 中每個路由器上配置的協定參數

RPL 實現必須允許配置以下 RPL 參數：

- RPLInstanceID[DIO 訊息，在 DIO Base 訊息中]。雖然必須在 DODAG 根上配置 RPLInstanceID，但還必須將其配置為每個節點上的策略，以確定該節點是否應加入特定 DODAG。請注意，如果節點成為浮動 DODAG 的根，則可以在節點上配置第二個 RPLInstanceID。
- 支援的目標編碼點(OCP)列表
- 支援的度量列表：[RFC6551]指定用於 DODAG 形成的許多度量和約束。因此，RPL 實現應該允許配置節點可以接受和理解

的度量列表。如果收到的 DIO 具有不理解或不支援的度量和/或約束，如第 8.5 節所述，該節點將作為葉節點加入。

- 前綴資訊，有效和優選壽命以及'L'和'A'旗標。[DIO 訊息，前綴資訊選項]。RPL 實現應該允許配置是否必須使用 DIO 訊息攜帶前綴資訊選項以分發自動配置的前綴資訊。在這種情況下，RPL 實現必須允許在 PIO 中公佈前綴列表以及相應的旗標。
- 請求資訊[DIS 訊息，在徵求資訊選項中]。請注意，RPL 實現應該允許配置何時應該發送此類訊息以及在何種情況下配置 RPLInstanceID 的值，'V'/'I'/'D'旗標。
- 'K'旗標：節點應在 DAO 訊息中設置'K'旗標[DAO 訊息，在 DAO 基本訊息中]。
- MOP(操作模式)[DIO 訊息，在 DIO 基本訊息中]。
- 路由資訊(和優選項)[DIO 訊息，在路由資訊選項中]

18.2.4. 在 LLN 中的每個非 DODAG 根路由器上配置的協定參數

RPL 實現必須允許配置目標前綴[DAO 訊息，在 RPL 目標選項中]。

此外，存在節點可能想要指定目標以允許對目標進行特定處理(優先級等)的情況。此類處理規則超出本規範的範圍。使用時，RPL 實現應該允許基於每個目標配置目標描述符(例如，使用訪問列表)。

DODAG 父集為空的節點可能成為浮動 DODAG 的 DODAG 根。它還可以設置其 DAG 優選，使其不太優選。因此，RPL 實現必須允許配置節點在這種情況下應該啟動的一組操作：

- 啟動自己的(浮動)DODAG：除了 DAG 優選之外，還必須配置新的 DODAGID。
- 毒化破碎的路徑(參見第 8.2.2.5 節中的程序)。

- 觸發本地維修。

18.2.5. 要在 DODAG 根上配置的參數

此外，其他幾個參數僅在 DODAG 根上配置，並在 DIO 訊息中攜帶的選項中公佈。

如第 8.3 節所述，RPL 實現使用涓流定時器來管理 DIO 訊息的發送。涓流算法的操作由一組可配置參數確定，這些參數必須是可配置的，然後由 DODAG 根在 DIO 訊息中沿 DODAG 廣告。

- DIOIntervalDoublings[DIO 訊息，在 DODAG 配置選項中]
- DIO 最小加倍[DIO 訊息，在 DODAG 配置選項中]
- DIORedundancyConstant[DIO 訊息，在 DODAG 配置選項中]
- 此外，RPL 實現應該允許配置以下 RPL 參數集：
- 路徑控制大小[DIO 訊息，在 DODAG 配置選項中]
- MinHopRankIncrease[DIO 訊息，在 DODAG 配置選項中]
- DODAGPreference 欄位[DIO 訊息，DIO Base 物件]
- DODAGID[DIO 訊息，在 DIO Base 選項中]和[DAO 訊息，當設置 DAO 訊息的'D'旗標時]

DAG 根行為：在某些情況下，如果節點無法加入接地的 DODAG，則節點可能不希望永久充當浮動 DODAG 根。例如，電池供電的節點可能不希望長時間充當浮動 DODAG 根。因此，RPL 實現可以支援配置節點是否可以在配置的時間段內充當浮動 DODAG 根的能力。

DAG 版本號增量：通過 DODAG 根配置，RPL 實現可以通過更新 DODAG 版本號來刷新 DODAG 狀態。RPL 實現應該允許配置

DODAG 根目錄是否使用周期性或事件觸發機制來控制 DODAG 版本號更改(觸發第 3.2.2 節中指定的全域修復)。

18.2.6. 與基於 DAO 的機制相關的 RPL 參數的配置

DAO 訊息是可選的，用於需要下行路由操作的 DODAG。本節介紹與 DAO 訊息相關的參數集，並提供有關其配置的建議。

如第 9.5 節所述，建議延遲向 DAO 父節點發送 DAO 訊息，以便最大化執行路由聚合的機會。收到 DAO 訊息後，節點應該啟動延遲 DAO 定時器。預設值為 DEFAULT_DAO_DELAY。RPL 實現可以允許配置延遲 DAO 定時器。

在儲存操作模式中，儲存節點可以遞增 DTSN，以便可靠地從其直接子節點觸發一組 DAO 更新，作為例行路由表更新和維護的一部分。RPL 實現可以允許配置一組規則，指定 DTSN 增量的觸發器(手動或基於事件)。

當 DAO 條目超時或無效時，節點應該合理地嘗試向每個 DAO 父節點報告無路徑。這些嘗試次數可以配置。

實現應該支援限制 DAO 訊息的發送速率。相關參數可以是可配置的。

18.2.7. 與安全機制相關的 RPL 參數的配置

如第 10 節所述，本文件中描述的安全功能是可選的實現，並且給定的實現可以支援所描述的安全功能的子集(包括空集)。

為此，支援所描述的安全特徵的實現可以在概念上實現安全策略數據庫。為了支援安全機制，RPL 實現應該允許配置以下參數的子集：

- 接受安全模式[不安全模式，預安裝模式，認證模式]
- 接受 KIM 值[安全區段中的安全 RPL 控制訊息]

- 接受電平值[安全區段中的安全 RPL 控制訊息]
- 接受算法值[安全區段中的安全 RPL 控制訊息]
- 支援 Authenticated 或 Preinstalled 鍵模式的關鍵材料。

此外，RPL 實現應該允許使用以下參數的子集配置 DODAG 根：

- 公佈的級別值[安全區段中的安全 DIO 訊息]
- 廣告的 KIM 值[安全區段中的安全 DIO 訊息]
- 公佈的算法值[安全 DIO 訊息，在安全區段]

18.2.8. 預設值

本文件指定以下 RPL 變數集的預設值：

```

DEFAULT_PATH_CONTROL_SIZE
DEFAULT_DIO_INTERVAL_MIN
DEFAULT_DIO_INTERVAL_DOUBLINGS
DEFAULT_DIO_REDUNDANCY_CONSTANT
DEFAULT_MIN_HOP_RANK_INCREASE
DEFAULT_DAO_DELAY

```

建議在協定中指定預設值；如上所述，正如[RFC5706]中所討論的那樣，預設值可能越來越不合理。RPL 是一種路由協定，預計將在許多環境中使用，其中網路特性(例如節點數量和鏈結和節點類型)預計會發生顯著變化。因此，這些預設值可能隨著上下文和技術的發展而變化。實際上，LLN 的相關技術(例如，硬體，鏈結層)在過去幾年中發生巨大變化，並且預計這些技術在未來幾年將發生巨大變化和發展。

建議的價值並非基於廣泛的最佳實踐，並被認為是保守的。

18.3. 監控 RPL 運作

應監控多個 RPL 參數以驗證路由協定和網路本身的正確操作。本節列出感興趣的監視參數集。

18.3.1. 監視 DODAG 參數

RPL 實現應該提供有關以下參數的資訊：

- DODAG 版本號[DIO 訊息，在 DIO 基本訊息中]
- 'G'旗標的狀態[DIO 訊息中的 DIO 訊息]
- MOP 欄位的狀態[DIO 訊息，在 DIO Base 訊息中]
- DTSN 值[DIO 訊息中的 DIO 訊息的值]
- 秩數值[DIO 訊息，在 DIO 基本訊息中]
- DAO 順序：在每個唯一的 DAO 訊息中遞增，在 DAO-ACK 訊息中回顯[DAO 和 DAO-ACK 訊息]
- 路由資訊[DIO 訊息，路由資訊選項](每個父節點的 IPv6 前綴列表以及壽命和優選項)
- 涓流參數：
 - * DIOIntervalDoublings[DIO 訊息，在 DODAG 配置選項中]
 - * DIOIntervalMin[DIO 訊息，在 DODAG 配置選項中]
 - * DIORedundancyConstant [DIO 訊息，在 DODAG 配置選項中]

僅可在 DODAG 根目錄上監視的值：

- 傳輸資訊[DAO，傳輸資訊選項]：RPL 實施應該允許配置是否應該在 DODAG 根上顯示所接收的傳輸資訊選項集。在這種情況下，收到的傳輸資訊的 RPL 資料庫還應包含路徑順序，路徑控制，路徑壽命和父位址。

18.3.2. 監控 DODAG 不一致和循環檢測

在 RPL 網路中檢測 DODAG 不一致性尤其重要。因此，建議 RPL 實施提供適當的監控工具。RPL 實現應該提供一個計數器，該計數器報告節點檢測到與 DODAG 父節點不一致的次數，例如，如果 DODAGID 已經改變。

如果可能的話，應提供有關不一致性檢測的更詳細資訊。RPL 實現可以提供報告以下不一致數量的計數器：

- 從具有更高秩數的節點設置'O'位(到「向下」)接收的封包
- 從具有較低秩數的節點清除(向上)'O'位的封包
- 'F'位元集的封包數
- 'R'位元集的封包數

18.4. 監控 RPL 資料結構

18.4.1. 候選鄰居資料結構

候選鄰居列表中的節點是通過相同方式發現的節點，並且有資格成為父節點(具有足夠高的本地置信度)。RPL 實現應該提供一種方法，允許用一些度量來監視候選鄰居列表，該度量反映一些度量所測量的局部置信度(鄰居的穩定度)。

如果候選鄰居的數量超過最大授權值，則 RPL 實現可以提供報告候選鄰居被忽略的次數的計數器。

18.4.2. 面向目的地的有向無循環圖(DODAG)表

對於每個 DODAG，RPL 實現應該跟蹤以下 DODAG 表值：

- RPLInstanceID
- DODAGID
- DODAG 版本號

- 秩數
- 目標編碼點
- 一組 DODAG 父母
- 沿 DODAG 向上提供一組前綴
- 涓流計時器用於管理 DODAG 的 DIO 訊息發送
- DAO 父母名單
- DTSN
- 節點狀態(路由器與葉子)

RPL 實現應該允許監視上面列出的參數集。

18.4.3. 路由表和 DAO 路由項目

RPL 實現維護與 DODAG 和 DAO 條目(用於儲存節點)相關的若干資訊元素。在非儲存節點的情況下，保持有限量的資訊(路由表主要被簡化為一組 DODAG 父節點以及如上所述的 DODAG 的特性)；而在儲存節點的情況下，該資訊用路由條目來增強。

RPL 實現應該允許監視以下參數：

- 下一個跳躍(DODAG 父母)
- 下一個跳躍的介面
- 每個 DODAG 父節點的路徑度量值

DAO 路由表項目在概念上包含以下元素(僅用於儲存節點)：

- 廣告鄰居資訊
- IPv6 位址

- 報告 DAO 父母已輸入此條目的介面 ID
- 重試計數器
- DAO 內容的邏輯等價物：
 - * DAO-序列
 - * 路徑順序
 - * DAO 壽命
 - * DAO 路徑控制
- 目的地前綴(或位址或 Mcast 組)

RPL 實現應該提供有關每個 DAO 路由表項目狀態的資訊。

18.5. 故障管理

故障管理是用於故障排除，驗證協定正確操作模式和網路設計的關鍵組件；此外，它是網路性能監控的關鍵組成部分。RPL 實施應該允許提供與故障管理相關的以下資訊：

- 記憶體溢出及原因(例如，路由表溢出等)
- 無法將封包發送到標記為有效的 DODAG 父節點的次數
- 收到路由器沒有相應 RPLInstanceID 的封包的次數
- 觸發本地修復過程的次數
- DODAG 根觸發全域修復的次數
- 收到的格式錯誤的郵件數
- 封包轉發的秒數，沒有下一跳(DODAG 父節點)

- 沒有下一跳的秒數(DODAG 父節點)
- 節點已將 DODAG 作為葉子加入的次數，因為它收到的 DIO 具有未被理解的度量/約束，並且在此情況下將其配置為作為葉節點加入(請參閱第 18.6 節)

建議至少通過錯誤日誌訊息報告錯誤。其他協定可用於報告此類故障。

18.6. 策略

RPL 實現可以使用策略規則來確定是否允許節點通過 DIO 訊息加入由鄰居廣告的特定 DODAG。

本文件指定單個 DODAG 中的操作。DODAG 的特徵在於以下元組(RPLInstanceID, DODAGID)。此外，如上所述，DIO 訊息用於廣告其他 DODAG 特徵，例如用於構建 DODAG 的路由度量和約束以及正在使用的目標函數(由 OCP 指定)。

第一個策略規則包括指定 RPL 節點加入 DODAG 必須滿足的以下條件：

- RPLInstanceID
- 支援的路由度量和約束列表
- 目標函數(OCP 值)

RPL 實現必須允許配置這些參數，並且應該指定如果廣告的 DODAG 不符合本地策略，節點是否必須簡單地忽略 DIO，或者如果僅支援的路由度量和約束列表，節點是否應該作為葉節點加入，OF 不受支援。此外，RPL 實現應該允許添加 DODAGID 作為策略的一部分。

RPL 實現應該允許配置由其目標編碼點(OCP)引用的一組節點加入 DODAG 的可接受或首選目標函數(OFs)，以及如果節點的候選

鄰居都沒有廣告其中一個，則應該採取什麼操作。配置的允許目標函數，或者如果不理解/支援所廣告的度量/約束。在這種情況下可以採取兩種措施：

- 節點將 DODAG 作為葉節點加入，如第 8.5 節所述。
- 節點未加入 DODAG。

LLN 中的節點可以從包括 RPL 的不同路由協定學習路由資訊。在這種情況下，希望通過管理偏好來控制哪個路線應該受到青睞。實現應該允許規範從中學習路由的路由協定的管理優選項。

內部資料結構：一些 RPL 實現可能限制候選鄰居列表的大小以限制內存使用；在這種情況下，可以不考慮一些其他可行的候選鄰居並且簡單地從候選鄰居列表中刪除。

RPL 實現可以提供關於候選鄰居列表的大小的表示符。

18.7. 故障隔離

建議隔離以不可接受的速率發送格式錯誤訊息的鄰居。

18.8. 對其他協定的影響

RPL 對其他協定的影響非常有限。如果路由器(例如 LBR)需要多個路由協定，則設備應支援路由協定之間的路由重分配功能，以允許兩個路由域之間的可達性。這種重新分配應該由用戶可配置策略的使用來管理。

關於網路流量的影響，RPL 旨在通過諸如涓流定時器(第 8.3 節)之類的機制來限制控制流量。因此，RPL 對其他協定的影響應該非常有限。

18.9. 績效管理

性能管理始終是協定的一個重要方面，RPL 也不例外。IP 性能監控(IPPM)工作組已經指定幾個感興趣的指標：儘管如此，考慮到

在設備資源和所需頻寬方面監控這些指標的成本，它們幾乎不適用於 LLN。仍然，RPL 實現可以支援其中的一些，並且下面列出其他感興趣的參數：

- 修復秒維修和時間數（平均值，方差）
- 由於路由表中缺少可達鄰居，設備無法轉發封包的次數和時間段
- 在頻寬和所需內存方面監控 RPL 的資源消耗
- 發送和接收的 RPL 控制訊息數

18.10. 診斷

可能存在應將節點置於「詳細」模式以改進診斷的情況。因此，RPL 實現應該提供將節點放入和放出詳細模式的能力，以便獲得額外的診斷資訊。

19. 安全考慮因素

19.1. 綜述

從安全角度來看，RPL 網路與任何其他網路沒有什麼不同。它們容易受到被動竊聽攻擊，甚至可能在對線路的物理訪問不需要參與通信時進行主動篡改。臨時網路的本質及其成本目標帶來額外的安全限制，這可能使這些網路成為最難以保護的環境。設備成本低，在計算能力，可用儲存和功耗方面的能力有限；不能總是假設他們擁有可靠的計算基礎或船上的高質量隨機數發生器。

通信不能依賴於固定基礎設施的在線可用性，並且可能涉及之前可能從未進行過通信的設備之間的短期關係。這些約束可能嚴重限制加密算法和協定的選擇並影響安全體系結構的設計，因為需要小心處理設備之間的信任關係的建立和維護。此外，電池壽命和成本限制嚴重限制這些網路可以容忍的安全開銷，這對於更高頻寬的網路來說遠沒有那麼重要。這些安全架構元素中的大多數

可以在更高層實現，因此可以認為超出本規範的範圍。但是，需要特別注意與這些較高層的介面。

本標準中的安全機制基於對稱密鑰和公鑰加密，並使用由更高層進程提供的密鑰。這些密鑰的建立和維護超出本規範的範圍。這些機制假定密碼操作的安全實現以及密鑰材料的安全和真實儲存。

指定的安全機制提供以下安全服務的特定組合：

資料機密性：確保傳輸的資訊僅向其預期的各方披露。

資料真實性：確保傳輸資訊的來源(因此，資訊在傳輸過程中未被修改)。

重播保護：確保檢測到傳輸資訊的副本。

及時性(延遲保護)：確保及時收到傳輸的資訊。

所提供的實際保護可以基於每個分組進行調整，並允許不同級別的數據真實性(以最小化所需的傳輸分組中的安全開銷)和可選的數據機密性。當需要非平凡的保護時，始終提供重複保護。

重複保護是通過在分組保護過程中使用非重複值（CCM 隨機數）的和的一些狀態信息存儲提供，其允許的是否該特定檢測（始發設備和所述 CCM 隨機數計數器最後從該設備接收到的）CCM nonce 值是由始發設備先前使用。此外，在板上具有鬆散同步時鐘的那些設備之間提供所謂的延遲保護。可接受的時間延遲可以基於每個分組進行調整，並允許變化的延遲(以促進通過多跳通信路徑傳輸的分組中的更長的延遲)。

密碼保護可以使用兩個對等設備（鏈路密鑰）或一組設備（組密鑰）之間共享的密鑰之間共享的密鑰，從而允許密鑰存儲和密鑰維護成本與所述密碼之間的一些靈活性和應用程序特定的權衡提供保護。如果一組密鑰用於對等通信，保護只針對外人的設備，而不是對抗鍵 - 共享組內潛在的惡意設備提供。

加密保護可以使用在兩個對等設備(鏈結密鑰)之間共享的密鑰或在一組設備(組密鑰)之間共享的密鑰，從而允許在密鑰儲存和密鑰維護成本與加密之間的一些靈活性和特定於應用程序的權衡。提供保護。如果組密鑰用於對等通信，則僅針對外部設備提供保護，而不針對密鑰共享組中的潛在惡意設備提供保護。

20. IANA 注意事項

20.1. RPL 控制訊息

RPL 控制訊息是要使用的 ICMP 資訊訊息類型，其攜帶 DODAG 資訊物件，DODAG 資訊請求和目的地廣告物件以支援 RPL 操作。

IANA 已定義 ICMPv6 類型編號註冊表。RPL 控制訊息的類型值是 155。

20.2. RPL 控制編碼的新註冊表

IANA 已為 ICMPv6 RPL 控制訊息的「編碼」欄位創建一個註冊表 RPL 控制編碼。

新的編碼只能由 IETF 審核分配。每個編碼都具有以下特性：

- 編碼
- 說明
- 定義 RFC

目前定義以下編碼：

Code	Description	Reference
0x00	DODAG Information Solicitation	This document
0x01	DODAG Information Object	This document
0x02	Destination Advertisement Object	This document
0x03	Destination Advertisement Object Acknowledgment	This document
0x80	Secure DODAG Information Solicitation	This document
0x81	Secure DODAG Information Object	This document
0x82	Secure Destination Advertisement Object	This document
0x83	Secure Destination Advertisement Object Acknowledgment	This document
0x8A	Consistency Check	This document

RPL 控制編碼

20.3. 新的操作模式登記處(MOP)

IANA 已為 3 位操作模式(MOP)創建一個註冊表，該註冊表包含在 DIO 基本中。

新值可能僅由 IETF 審核分配。跟蹤每個值具有以下品質：

- 營運模式價值
- 能力描述
- 定義 RFC

目前定義四個值：

MOP value	Description	Reference
0	No Downward routes maintained by RPL	This document
1	Non-Storing Mode of Operation	This document
2	Storing Mode of Operation with no multicast support	This document
3	Storing Mode of Operation with multicast support	This document

DIO 模式的運作

其餘的範圍，小數 4 到 7，目前未分配。

20.4. RPL 控制訊息選項

IANA 已為 RPL 控制訊息選項創建一個註冊表。

新值可能僅由 IETF 審核分配。跟蹤每個值具有以下特性：

- 值
- 意義
- 定義 RFC

Value	Meaning	Reference
0x00	Pad1	This document
0x01	PadN	This document
0x02	DAG Metric Container	This Document
0x03	Routing Information	This Document
0x04	DODAG Configuration	This Document
0x05	RPL Target	This Document
0x06	Transit Information	This Document
0x07	Solicited Information	This Document
0x08	Prefix Information	This Document
0x09	Target Descriptor	This Document

RPL 控制訊息選項

20.5. 物件編碼點(OCP)註冊表

IANA 創建一個註冊表來管理目標編碼點(OCP)欄位的編碼空間。

本規範中未定義任何 OCP。

新編碼只能由 IETF 審核分配。每個編碼都具有以下特性：

- 編碼
- 說明
- 定義 RFC

20.6. 安全區段算法的新註冊表

IANA 已在「安全性」部分中為 8 位算法欄位的值創建一個註冊表。

新值可能僅由 IETF 審核分配。跟蹤每個值具有以下品質：

- 值
- 加密/MAC
- 簽名
- 定義 RFC

目前定義以下值：

Value	Encryption/MAC	Signature	Reference
0	CCM with AES-128	RSA with SHA-256	This document

安全區段算法

20.7. 安全區段旗標的新註冊表

IANA 為 8 位安全區段旗標欄位創建一個註冊表。

新的位元數可能僅由 IETF 評審分配。跟蹤每個位元具有以下特性：

- 位元號(從位元 0 開始計數為最高位)
- 能力描述
- 定義 RFC

當前沒有為安全區段旗標欄位定義位元。

20.8. 每個 KIM 安全級別的新註冊表

IANA 為每個分配的 KIM 值創建一個 3 位安全級別(LVL)欄位的註冊表。

對於給定的 KIM 值，只能通過 IETF 評審分配新級別。每個級別都具有以下特質：

- 級別
- KIM 值
- 說明
- 定義 RFC

目前定義每個 KIM 值的以下級別：

Level	KIM value	Description	Reference
0	0	See Figure 11	This document
1	0	See Figure 11	This document
2	0	See Figure 11	This document
3	0	See Figure 11	This document
0	1	See Figure 11	This document
1	1	See Figure 11	This document
2	1	See Figure 11	This document
3	1	See Figure 11	This document
0	2	See Figure 11	This document
1	2	See Figure 11	This document
2	2	See Figure 11	This document
3	2	See Figure 11	This document
0	3	See Figure 11	This document
1	3	See Figure 11	This document
2	3	See Figure 11	This document
3	3	See Figure 11	This document

每 KIM 安全級別

20.9. DODAG 資訊請求(DIS)旗標的新註冊表

IANA 已為 DIS(DODAG 資訊徵集)旗標欄位創建一個註冊表。

新的位元數可能僅由 IETF 評審分配。跟蹤每個位元具有以下特性：

- 位元號(從位元 0 開始計數為最高位)
- 能力描述
- 定義 RFC

目前沒有為 DIS(DODAG 資訊請求)旗標欄位定義位元。

20.10. DODAG 資訊物件(DIO)旗標的新註冊表

IANA 為 8 位元 DODAG 資訊物件(DIO)旗標欄位創建一個註冊表。

新的位元數可能僅由 IETF 評審分配。跟蹤每個位元具有以下特性：

- 位元號(從位元 0 開始計數為最高位)
- 能力描述
- 定義 RFC

目前沒有為 DIS(DODAG 資訊請求)旗標定義位元。

20.11. 目的地廣告物件(DAO)旗標的新註冊表

IANA 已為 8 位元目的地廣告物件(DAO)旗標欄位創建一個註冊表。

新的位元數可能僅由 IETF 評審分配。跟蹤每個位元具有以下特性：

- 位元號(從位元 0 開始計數為最高位)
- 能力描述
- 定義 RFC

目前定義以下的位元：

Bit number	Description	Reference
0	DAO-ACK request (K)	This document
1	DODAGID field is present (D)	This document

DAO 基本旗標

20.12. 目的地廣告物件(DAO)確認旗標的新註冊表

IANA 已為 8 位元目的地廣告物件(DAO)確認旗標欄位創建一個註冊表。

新的位元數可能僅由 IETF 評審分配。跟蹤每個位元具有以下特性：

- 位元號(從位 0 開始計數為最高位)
- 能力描述
- 定義 RFC

目前定義以下位元：

Bit number	Description	Reference
0	DODAGID field is present (D)	This document

DAO-ACK 基本旗標

20.13. 新一致性檢查(CC)旗標註冊表

IANA 已為 8 位元一致性檢查(CC)旗標欄位創建一個註冊表。

新的位元數可能僅由 IETF 評審分配。跟蹤每個位元具有以下特性：

- 位元號(從位元 0 開始計數為最高位)
- 能力描述
- 定義 RFC

目前定義以下位元：

Bit number	Description	Reference
0	CC Response (R)	This document

一致性檢查基本旗標

20.14. DODAG 配置選項旗標的新註冊表

IANA 已為 8 位元 DODAG 配置選項旗標欄位創建一個註冊表。

新的位元數可能僅由 IETF 評審分配。跟蹤每個位元具有以下特性：

- 位元號(從位元 0 開始計數為最高位)
- 能力描述
- 定義 RFC

目前定義以下位元：

Bit number	Description	Reference
4	Authentication Enabled (A)	This document
5-7	Path Control Size (PCS)	This document

DODAG 配置選項旗標

20.15.RPL 目標選項旗標的新註冊表

IANA 已為 8 位元 RPL 目標選項旗標欄位創建一個註冊表。

新的位元數可能僅由 IETF 評審分配。跟蹤每個位元具有以下特性：

- 位元號(從位元 0 開始計數為最高位)
- 能力描述
- 定義 RFC

目前沒有為 RPL 目標選項旗標定義位元。

20.16.新的傳輸資訊選項旗標註冊表

IANA 為 8 位元傳輸資訊選項(TIO)旗標欄位創建一個註冊表。

新的位元數可能僅由 IETF 評審分配。跟蹤每個位元具有以下特性：

- 位元號(從位 0 開始計數為最高位)
- 能力描述
- 定義 RFC

目前定義以下位元：

Bit number	Description	Reference
0	CC Response (R)	This document

傳輸資訊選項旗標

20.17. 請求資訊選項旗標的新註冊表

IANA 已為 8 位元請求資訊選項(SIO)旗標欄位創建一個註冊表。

新的位元數可能僅由 IETF 評審分配。跟蹤每個位元具有以下特性：

- 位元號(從位元 0 開始計數為最高位)
- 能力描述
- 定義 RFC

目前定義以下位元：

Bit number	Description	Reference
0	Version Predicate match (V)	This document
1	InstanceID Predicate match (I)	This document
2	DODAGID Predicate match (D)	This document

請求資訊選項旗標

20.18. ICMPv6：源路由標頭中的錯誤

在某些情況下，當無法按其源路由頭指定的方式傳遞訊息時，RPL 將返回 ICMPv6 錯誤訊息。此 ICMPv6 錯誤訊息是「源路由標頭中的錯誤」。

IANA 為 ICMPv6 訊息類型定義 ICMPv6 「編碼」欄位註冊表。ICMPv6 訊息類型 1 描述「目標無法到達」編碼。已從 ICMPv6

編碼欄位註冊表中為 ICMPv6 訊息類型 1 分配「源路由頭中的錯誤」編碼，編碼值為 7。

20.19. 鏈結本地範圍組播位址

分配新 IPv6 組播位址的規則在[RFC3307]中定義。該規範要求為稱為 all-RPL 節點的 RPL 節點分配具有鏈結本地範圍的新永久多播位址，其值為 ff02::1a。

21. 致謝

作者要感謝 Emmanuel Baccelli、Dominique Barthel、Yusuf Bashir、Yoav Ben-Yehezkel、Phoebus Chen、Quynh Dang、Mischa Dohler、Mathilde Durvy、Joakim Eriksson、Omprakash Gnawali、Manhar Goindi、Mukul Goyal、Ulrich Herberg、Anders Jagd、JeongGil(John)Ko、Ajay Kumar、Quentin Lampin、Jerry Martocci、Matteo Paris、Alexandru Petrescu、Joseph Reddy、Michael Richardson、Don Sturek、Joydeep Tripathi 和 Nicolas Tsiftes 的審查、反饋和評論。

作者要感謝 ROLL 主席 David Culler、JP. Vasseur 以及區域總監 Adrian Farrel 提供的指導和意見。

作者要感謝 Robert Assimiti、Mischa Dohler、Julien Abeille、Ryuji Wakikawa、Teco Boot、Patrick Wetterwald、Bryan McLaughlin、Carlos J. Bernardos、Thomas Watteyne、Zach Shelby、Caroline Bontoux、Marco Molteni、Billy Moon、Jim Bound、Yanick Pouffary、Henning Rogge 和 Arsalan Tavakoli 先前的貢獻，為 RPL 提供有用的 RPL 設計考慮因素。

RPL 安全設計，見第 10 節，第 19 節和整個文件的其他部分，主要是安全設計團隊的貢獻：Tzeta Tsao、Roger Alexander、Dave Ward、Philip Levis、Kris Pister、Rene Struik 和 Adrian Farrel。

還要感謝 Jari Arkko 和 Ralph Droms 的細心評論，尤其是在互操作性考慮和與其他 IETF 規範的集成方面。

22. 貢獻者

Stephen Dawson-Haggerty
UC Berkeley
Soda Hall Berkeley, CA 94720
USA

EMail: stevedh@cs.berkeley.edu

23. 參考文獻

23.1. 規範性參考文獻

- [RFC2119] Bradner, S., "Key words for use in RFCs to Indicate Requirement Levels", BCP 14, RFC 2119, March 1997.
- [RFC2460] Deering, S. and R. Hinden, "Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification", RFC 2460, December 1998.
- [RFC3447] Jonsson, J. and B. Kaliski, "Public-Key Cryptography Standards (PKCS) #1: RSA Cryptography Specifications Version 2.1", RFC 3447, February 2003.
- [RFC4191] Draves, R. and D. Thaler, "Default Router Preferences and More-Specific Routes", RFC 4191, November 2005.
- [RFC4302] Kent, S., "IP Authentication Header", RFC 4302, December 2005.
- [RFC4443] Conta, A., Deering, S., and M. Gupta, "Internet Control Message Protocol (ICMPv6) for the Internet Protocol Version 6 (IPv6) Specification", RFC 4443, March 2006.
- [RFC4861] Narten, T., Nordmark, E., Simpson, W., and H. Soliman, "Neighbor Discovery for IP version 6 (IPv6)", RFC 4861, September 2007.

- [RFC4862] Thomson, S., Narten, T., and T. Jinmei, "IPv6 Stateless Address Autoconfiguration", RFC 4862, September 2007.
- [RFC6206] Levis, P., Clausen, T., Hui, J., Gnawali, O., and J. Ko, "The Trickle Algorithm", RFC 6206, March 2011.
- [RFC6275] Perkins, C., Johnson, D., and J. Arkko, "Mobility Support in IPv6", RFC 6275, July 2011.
- [RFC6551] Vasseur, JP., Ed., Kim, M., Ed., Pister, K., Dejean, N., and D. Barthel, "Routing Metrics Used for Path Calculation in Low-Power and Lossy Networks", RFC 6551, March 2012.
- [RFC6552] Thubert, P., Ed., "Objective Function Zero for the Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL)", RFC 6552, March 2012.
- [RFC6553] Hui, J. and JP. Vasseur, "The Routing Protocol for Low- Power and Lossy Networks (RPL) Option for Carrying RPL Information in Data-Plane Datagrams", RFC 6553, March 2012.
- [RFC6554] Hui, J., Vasseur, JP., Culler, D., and V. Manral, "An IPv6 Routing Header for Source Routes with the Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL)", RFC 6554, March 2012.

23.2. 資訊參考

- [6LoWPAN-ND] Shelby, Z., Ed., Chakrabarti, S., and E. Nordmark, "Neighbor Discovery Optimization for Low Power and Lossy Networks (6LoWPAN)", Work in Progress, October 2011.
- [FIPS180] National Institute of Standards and Technology, "FIPS Pub 180-3, Secure Hash Standard (SHS)", US Department of Commerce , February 2008,

<http://www.nist.gov/itl/upload/fips180-3_final.pdf>.

- [Perlman83] Perlman, R., "Fault-Tolerant Broadcast of Routing Information", North-Holland Computer Networks, Vol.7: p. 395-405, December 1983.
- [RFC1958] Carpenter, B., "Architectural Principles of the Internet", RFC 1958, June 1996.
- [RFC1982] Elz, R. and R. Bush, "Serial Number Arithmetic", RFC 1982, August 1996.
- [RFC2578] McCloghrie, K., Ed., Perkins, D., Ed., and J. Schoenwaelder, Ed., "Structure of Management Information Version 2 (SMIv2)", STD 58, RFC 2578, April 1999.
- [RFC3307] Haberman, B., "Allocation Guidelines for IPv6 Multicast Addresses", RFC 3307, August 2002.
- [RFC3410] Case, J., Mundy, R., Partain, D., and B. Stewart, "Introduction and Applicability Statements for Internet-Standard Management Framework", RFC 3410, December 2002.
- [RFC3535] Schoenwaelder, J., "Overview of the 2002 IAB Network Management Workshop", RFC 3535, May 2003.
- [RFC3610] Whiting, D., Housley, R., and N. Ferguson, "Counter with CBC-MAC (CCM)", RFC 3610, September 2003.
- [RFC3819] Karn, P., Bormann, C., Fairhurst, G., Grossman, D., Ludwig, R., Mahdavi, J., Montenegro, G., Touch, J., and Wood, "Advice for Internet Subnetwork Designers", BCP 89, RFC 3819, July 2004.
- [RFC4101] Rescorla, E. and IAB, "Writing Protocol

Models", RFC 4101, June 2005.

- [RFC4915] Psenak, P., Mirtorabi, S., Roy, A., Nguyen, L., and P. Pillay-Esnault, "Multi-Topology (MT) Routing in OSPF", RFC 4915, June 2007.
- [RFC5120] Przygienda, T., Shen, N., and N. Sheth, "M-ISIS: Multi Topology (MT) Routing in Intermediate System to Intermediate Systems (IS-ISs)", RFC 5120, February 2008.
- [RFC5184] Teraoka, F., Gogo, K., Mitsuya, K., Shibui, R., and K. Mitani, "Unified Layer 2 (L2) Abstractions for Layer 3 (L3)-Driven Fast Handover", RFC 5184, May 2008.
- [RFC5548] Dohler, M., Watteyne, T., Winter, T., and D. Barthel, "Routing Requirements for Urban Low-Power and Lossy Networks", RFC 5548, May 2009.
- [RFC5673] Pister, K., Thubert, P., Dwars, S., and T. Phinney, "Industrial Routing Requirements in Low-Power and Lossy Networks", RFC 5673, October 2009.
- [RFC5706] Harrington, D., "Guidelines for Considering Operations and Management of New Protocols and Protocol Extensions", RFC 5706, November 2009.
- [RFC5826] Brandt, A., Buron, J., and G. Porcu, "Home Automation Routing Requirements in Low-Power and Lossy Networks", RFC 5826, April 2010.
- [RFC5867] Martocci, J., De Mil, P., Riou, N., and W. Vermeylen, "Building Automation Routing Requirements in Low-Power and Lossy Networks", RFC 5867, June 2010.
- [RFC5881] Katz, D. and D. Ward, "Bidirectional Forwarding

Detection (BFD) for IPv4 and IPv6 (Single Hop)", RFC 5881, June 2010.

[RFC6130] Clausen, T., Dearlove, C., and J. Dean, "Mobile Ad Hoc Network (MANET) Neighborhood Discovery Protocol (NHDP)", RFC 6130, April 2011.

[ROLL-TERMS] Vasseur, J., "Terminology in Low power And Lossy Networks", Work in Progress, September 2011.

附錄 A. 示例操作

本附錄提供一些示例來說明使用 RPL 傳播尋址資訊和前綴。這些示例描述與 PIO 和 RIO 一起分發的資訊以及 DIO 和 DAO 訊息的使用。請注意，本附錄不是規範性的，並且 RPL 尋址計劃和自動配置的具體細節可能根據具體實現而有所不同。RPL 僅提供用於傳播可以建立在其他機制上並由其他機制使用的資訊的工具。

本附錄提供一些示例來說明使用 RPL 傳播尋址資訊和前綴。這些示例描述與 PIO 和 RIO 一起分發的資訊以及 DIO 和 DAO 訊息的使用。請注意，本附錄不是規範性的，並且 RPL 尋址計劃和自動配置的具體細節可能根據具體實現而有所不同。RPL 僅提供用於傳播可以建立在其他機制上並由其他機制使用的資訊的工具。

A.1. 使用節點擁有的前綴儲存模式的示例操作

圖 32 說明在儲存模式下運行的簡單 RPL 網路的邏輯尋址架構。在此示例中，每個節點 A、B、C 和 D 擁有自己的前綴，並使該前綴可用於鏈結上設備的位址自動配置。(這是通過在 DIO 訊息的 PIO 中設置'A'旗標和'L'旗標來傳達的。節點 A 擁有前綴 A::/64，節點 B 擁有 B::/64，依此類推。節點 B 自動配置關於節點 A，A::B 的鏈結上的位址。節點 C 和 D 類似地分別從節點 B 的前綴 B::C 和 B::D 自動配置鏈結上的位址。節點可以選擇設置'R'旗標並在 PIO 的 Prefix 欄位中發布它們的位址。

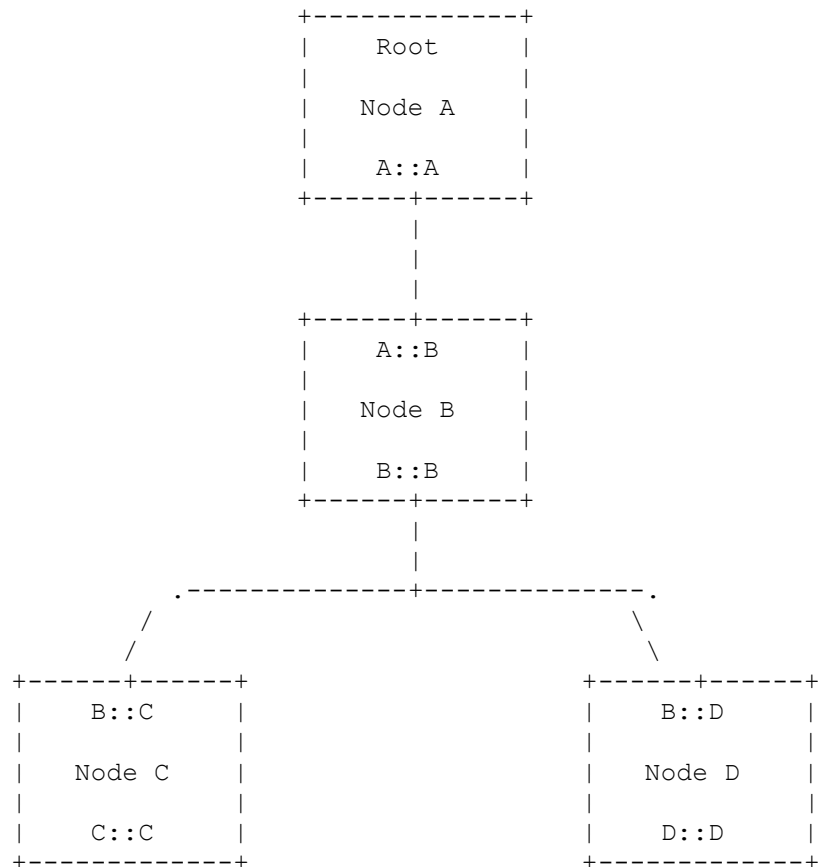


圖 32：使用擁有節點的前綴儲存模式

A.1.1.DIO 訊息和 PIO

以節點 A 為例，將會使用 PIO 發送 DIO 訊息，如下所示：

'A'旗標： 設置

'L'旗標： 設置

'R'旗標： 清除

前綴長度： 64

前綴： A::

以節點 B 為例，將會使用 PIO 發送 DIO 訊息，如下所示：

'A'旗標： 設置

'L'旗標： 設置

'R'旗標： 清除

前綴長度： 64

前綴： B::B

以節點 C 為例，將會使用 PIO 發送 DIO 訊息，如下所示：

'A'旗標： 設置
'L'旗標： 設置
'R'旗標： 清除
前綴長度： 64
前綴： C::

以節點 D 為例，將會使用 PIO 發送 DIO 訊息，如下所示：

'A'旗標： 設置
'L'旗標： 設置
'R'旗標： 清除
前綴長度： 64
前綴： D::D

A.1.2. DAO 訊息

節點 B 將使用以下資訊向節點 A 發送 DAO 訊息：

- 目標 B::/64
- 目標 C::/64
- 目標 D::/64

節點 C 將使用以下資訊向節點 B 發送 DAO 訊息：

- 目標 C::/64

節點 D 將使用以下資訊向節點 B 發送 DAO 訊息：

- 目標 D::/64

A.1.3.路由資訊庫

節點 A 將在概念上將以下資訊收集到其路由資訊庫(RIB)中：

- A::/64 已連接
- B::/64 通過 B 的本地鏈結
- C::/64 通過 B 的本地鏈結
- D::/64 通過 B 的本地鏈結

節點 B 將在概念上將以下資訊收集到其 RIB 中：

- ::/0 通過 A 的本地鏈結

- B::/64 連接
- C::/64 通過 C 的本地鏈結
- D::/64 通過 D'鏈結本地

節點 C 將在概念上將以下資訊收集到其 RIB 中：

- ::/0 通過 B 的本地鏈結
- C::/64 已連接

節點 D 將在概念上將以下資訊收集到其 RIB 中：

- ::/0 通過 B 的本地鏈結
- D::/64 已連接

A.2. 使用子網寬前綴儲存模式的示例操作

圖 33 說明在儲存模式下運行的簡單 RPL 網路的邏輯尋址架構。在此示例中，根節點 A 提供用於整個 RPL 子網上的位址自動配置的前綴。(這是通過設置'A'旗標並清除 DIO 訊息的 PIO 中的'L'旗標來傳達的。)節點 A、B、C 和 D 都自動配置為前綴 A::/64。節點可以選擇設置'R'旗標並在 PIO 的 Prefix 欄位中發布它們的位址。

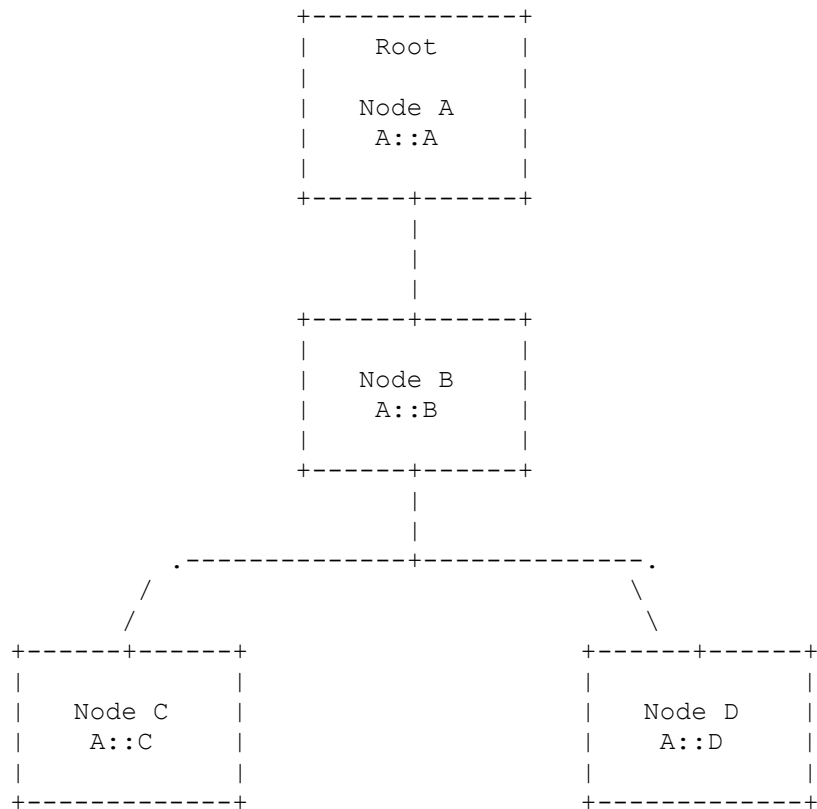


圖 33：使用子網寬前綴儲存模式

A.2.1. DIO 訊息和 PIO

以節點 A 為例，使用 PIO 發送 DIO 訊息，如下所示：

'A'旗標： 設置
 'L'旗標： 清除
 'R'旗標： 清除
 前綴長度： 64
 前綴： A::

以節點 B 為例，使用 PIO 發送 DIO 訊息，如下所示：

'A'旗標： 設置
 'L'旗標： 清除
 'R'旗標： 清除
 前綴長度： 64
 前綴： A::B

以節點 C 為例，使用 PIO 發送 DIO 訊息，如下所示：

'A'旗標： 設置
'L'旗標： 清除
'R'旗標： 清除
前綴長度： 64
前綴： A ::

以節點 D 為例，使用 PIO 發送 DIO 訊息，如下所示：

'A'旗標： 設置
'L'旗標： 清除
'R'旗標： 清除
前綴長度： 64
前綴： A::D

A.2.2.DAO 訊息

節點 B 將攜帶以下訊息發送 DAO 訊息到節點 A：

- 目標 A::B/128
- 目標 A::C/128
- 目標 A::d/128

節點 c 將攜帶以下訊息發送 DAO 訊息到節點 B：

- 目標 A::C/128

節點 D 將攜帶以下訊息發送 DAO 訊息到節點 B：

- 目標 A::d/128

A.3.具有節點擁有的前綴的非儲存模式下的示例操作

圖 34 說明在非儲存模式下運行的簡單 RPL 網路的邏輯尋址架構。在此示例中，每個節點 A、B、C 和 D 擁有自己的前綴，並使該前綴可用於鏈結上設備的位址自動配置。(這是通過在 DIO 訊息的 PIO 中設置'A'旗標和'L'旗標來傳達的。)節點 A 擁有前綴 A::/64，節點 B 擁有 B::/64，依此類推。節點 B 自動配置關於節點 A，A::B 的鏈結上位址。節點 C 和 D 類似地分別從節點 B 的前綴 B::C 和 B::D 自動配置鏈結上的位址。節點可以選擇設置'R'旗標並在 PIO 的字首領域中發布它們的位址。

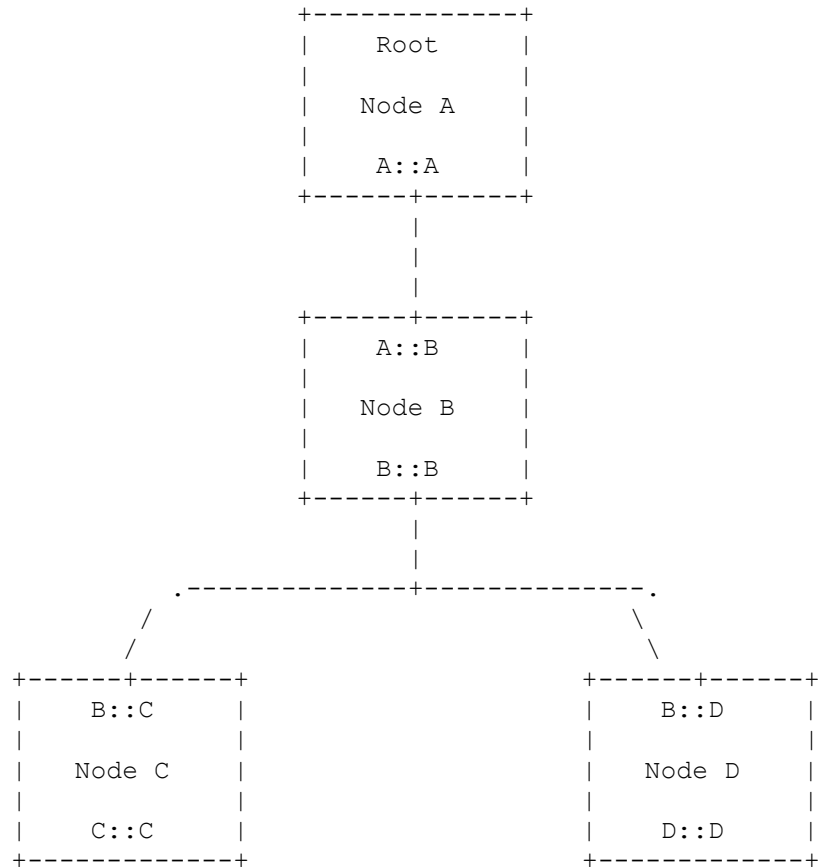


圖 34：具有節點擁有的前綴的非儲存模式

A.3.1.DIO 訊息和 PIO

具有節點擁有前綴的非儲存模式中的 DIO 訊息中包含的 PIO 可以被認為與具有節點擁有前綴的儲存模式中的 PIO 相同(附錄 A.1.1)。

A.3.2.DAO 訊息

節點 B 將使用以下資訊向節點 A 發送 DAO 訊息：

- 目標 B::/64，傳輸 A::B

節點 C 將使用以下資訊向節點 A 發送 DAO 訊息：

- 目標 C::/64，傳輸 B::C

節點 D 將使用以下資訊向節點 A 發送 DAO 訊息：

- 目標 D::/64，傳輸 B::D.

A.3.3.路由資訊庫

節點 A 將在概念上將以下資訊收集到其 RIB 中。請注意，節點 A 有足夠的資訊通過對 RIB 進行遞歸查找來構造源路由：

- A::/64 已連接
- B::/64 通過 A::B
- C::/64 通過 B::C
- D::/64 通過 B::D

節點 B 將在概念上將以下資訊收集到其 RIB 中：

- ::/0 通過 A 的本地鏈結
- B::/64 連接

節點 C 將在概念上將以下資訊收集到其 RIB 中：

- ::/0 通過 B 的本地鏈結
- C::/64 已連接

節點 D 將在概念上將以下資訊收集到其 RIB 中：

- ::/0 通過 B 的本地鏈結
- D::/64 已連接

A.4. 具有子網寬前綴的非儲存模式下的示例操作

圖 35 說明在非儲存模式下運行的簡單 RPL 網路的邏輯尋址架構。在此示例中，根節點 A 提供用於整個 RPL 子網上的位址自動配置的前綴。(這是通過設置'A'旗標並清除 DIO 訊息的 PIO 中的'L'旗標來傳達的。)節點 A、B、C 和 D 都自動配置為前綴 A::/64。節點必須設置'R'旗標並在 PIO 的 Prefix 欄位中發布它們的位址，以便通知他們的孩子在轉接選項中使用哪個位址。

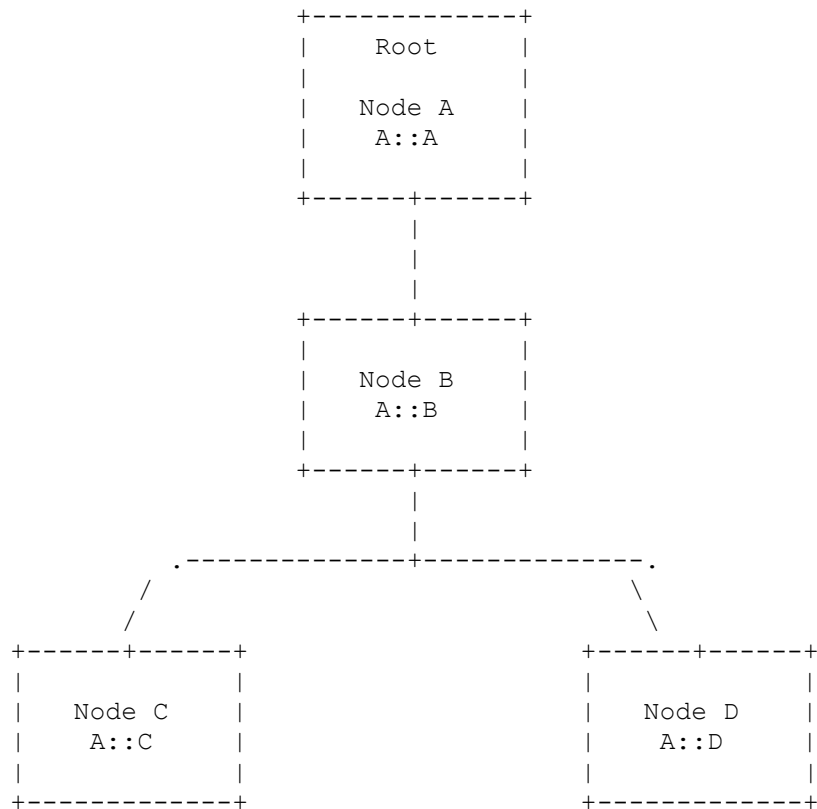


圖 35：具有子網寬前綴的非儲存模式

A.4.1.DIO 訊息和 PIO

以節點 A 為例，使用 PIO 發送 DIO 訊息，如下所示：

'A'旗標： 設置
 'L'旗標： 清除
 'R'旗標： 設置
 前綴長度： 64
 前綴： A::A

以節點 B 為例，使用 PIO 發送 DIO 訊息，如下所示：

'A'旗標： 設置
 'L'旗標： 清除
 'R'旗標： 設置
 前綴長度： 64
 前綴： A::B

以節點 C 為例，使用 PIO 發送 DIO 訊息，如下所示：

'A'旗標： 設置
'L'旗標： 清除
'R'旗標： 設置
前綴長度： 64
前綴： A::C

以節點 D 為例，使用 PIO 發送 DIO 訊息，如下所示：

'A'旗標： 設置
'L'旗標： 清除
'R'旗標： 設置
前綴長度： 64
前綴： A::D

A.4.2. DAO 訊息

節點 B 將使用以下資訊向節點 A 發送 DAO 訊息：

- 目標 A::B/128，傳輸 A::A.

節點 C 將使用以下資訊向節點 A 發送 DAO 訊息：

- 目標 A::C/128，傳輸 A::B

節點 D 將使用以下資訊向節點 A 發送 DAO 訊息：

- 目標 A::D/128，傳輸 A::B

A.4.3. 路由資訊庫

節點 A 將在概念上將以下資訊收集到其 RIB 中。請注意，節點 A 有足夠的資訊通過對 RIB 進行遞歸查找來構造源路由：

- A::A/128 連接
- A::B/128 通過 A::A
- A::C/128 通過 A::B
- A::D/128 通過 A::B

節點 B 將在概念上將以下資訊收集到其 RIB 中：

- ::/0 通過 A 的本地鏈結
- A:: B/128 連接

節點 C 將在概念上將以下資訊收集到其 RIB 中：

- `::/0` 通過 B 的本地鏈結
- `A:: C/128` 已連接

節點 D 將在概念上將以下資訊收集到其 RIB 中：

- `::/0` 通過 B 的本地鏈結
- `A:: D/128` 連接

A.5.帶外部前綴的示例

考慮圖 36 中所示的簡單網路。在此示例中，有一組路由器參與 RPL 網路：DODAG 根，節點 A、Y 和 Z。DODAG 根和節點 Z 也具有到不同外部網路的連接域(即 RPL 網路外部)。注意，那些外部網路可以是 RPL 網路或其他類型的網路。

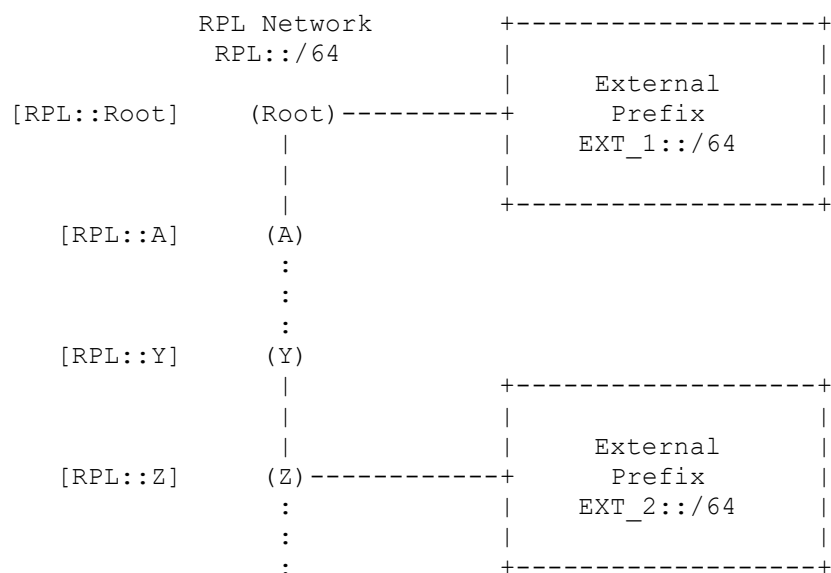


圖 36：簡單網路範例

在此範例中，DODAG 根為 RPL 子網提供可用於位址自動配置的前綴。這裡，整個 RPL 子網使用相同的前綴 `RPL::/64` 進行位址自動配置，但在其他實現中，可以採用更複雜/混合的方案。

DODAG 根連接到外部(相對於該 RPL 網路)前綴 `EXT_1::/64`。DODAG 根可能已經了解到與此前綴的連接，例如，通過非 RPL 介面上的顯式配置或 IPv6 ND。DODAG 根配置為公佈有關此前綴的連接的資訊。

同樣地，節點 Z 與外部前綴 EXT_2::/64 連接。節點 Z 下面還有一個 Sub-DODAG。

1. DODAG 根為其 DIO 訊息添加一個 RIO。RIO 包含外部前綴 EXT_1::/64。該資訊可以在 DODAG 內的其他節點發出的 DIO 訊息中重複。因此，前綴 EXT_1::/64 的可達性在 DODAG 下傳播。
2. 節點 Z 可以通過使用 EXT_2::/64 作為目標選項中的目標並且其本身(節點 Z)作為傳輸資訊選項中的父節點發送 DAO 訊息來向目標網路 EXT_2::/64 廣告可達性。(在儲存模式下，傳輸資訊選項不需要包含節點 Z 的位址)。然後，非儲存根知道用於構造源路由的 1 跳鏈結(節點 Z-EXT_2::/64)。節點 Z 還可以通過用 PIO 發送 DIO 訊息並清除'A'旗標，將其對 EXT_2::/64 的可達性廣告給其 Sub-DODAG 中的節點。

作者資訊

Tim Winter (editor)

EMail: wintert@acm.org

Pascal Thubert (editor)

Cisco Systems

Village d'Entreprises Green Side

400, Avenue de Roumanille

Batiment T3

Biot - Sophia Antipolis 06410

France

Phone: +33 497 23 26 34

EMail: pthubert@cisco.com

Anders Brandt

Sigma Designs

Emdrupvej 26A, 1.

Copenhagen DK-2100

Denmark

EMail: abr@sdesigns.dk

Jonathan W. Hui
Arch Rock Corporation
501 2nd St., Suite 410
San Francisco, CA 94107
USA

EMail: jhui@archrock.com

Richard Kelsey
Ember Corporation
Boston, MA
USA

Phone: +1 617 951 1225
EMail: kelsey@ember.com

Philip Levis
Stanford University
358 Gates Hall, Stanford University
Stanford, CA 94305-9030
USA

EMail: pal@cs.stanford.edu

Kris Pister
Dust Networks
30695 Huntwood Ave.
Hayward, CA 94544
USA

EMail: kpister@dustnetworks.com

Rene Struik
Struik Security Consultancy

EMail: rstruik.ext@gmail.com

JP. Vasseur
Cisco Systems
11, Rue Camille Desmoulins
Issy Les Moulineaux 92782
France

EMail: jpv@cisco.com

Roger K. Alexander
Cooper Power Systems
20201 Century Blvd., Suite 250
Germantown, MD 20874
USA

Phone: +1 240 454 9817
EMail: roger.alexander@cooperindustries.com