

18. RFC 8138 : IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Network
(6LoWPAN) Routing Header

RFC 8138 : Pv6 低功率無線個人區域網路 (6LoWPAN) 路由標頭

網際網路工程任務組 (IETF)

Request for Comments : 8138

分類 : 標準

ISSN: 2070-1721

P. Thubert, Ed.

Cisco

C. Bormann

Uni Bremen TZI

L. Toutain

IMT Atlantique

R. Cragie

ARM

2017 年 4 月

IPv6 低功率無線個人區域網路 (6LoWPAN) 路由
標頭

摘要

該規範引入一種新的 IPv6 低功率無線個人區域網路 (6LoWPAN) 調度類型，用於 6LoWPAN 路由拓撲，最初涵蓋低功耗和有損網路 (RPL) 封包壓縮路由協定的需求 ([RFC 6550](#))。使用此分派類型，此規範定義一種壓縮 RPL 選項 ([RFC 6553](#)) 訊息和路由標頭類型 3 ([RFC 6554](#)) 的方法，這是一種高效的 IP-in-IP 技術，並且可擴充用於更多應用程序。

本文的狀態

這是網際網路標準文件。

本文是網際網路工程任務組 (IETF) 的產品。它代表 IETF 社群的共識。已通過公眾審查，並也獲得網際網路工程指導組 (IESG) 的批准發布。有關網際網路標準的更多訊息，請參見 [RFC 7841](#) 的 [第 2 部分](#)。

有關本文當前狀態，任何勘誤以及如何提供反饋訊息，請參訪 <http://www.rfc-editor.org/info/rfc8138>。

版權聲明

版權所有 (c) 2016 IETF 信託和被確認為文件作者的人員。版權所有。

本文受 [BCP 78](http://trustee.ietf.org/license-info) 和 IETF 信託有關 IETF 文件的法律規定 (<http://trustee.ietf.org/license-info>) 約束，該文件自其發布之日起生效。請仔細閱讀這些文件，因為它們描述您對本文的權利和限制。從本文中提取的程式碼組件必須包含信任法律規定第 4.e 節中所述的簡化 BSD 許可文本，並且不提供簡化 BSD 許可中所述的保證。

目錄	
1. 前言	4
2. 術語	7
3. 使用頁面調度	7
3.1. 新的路由標頭調度 (6LoRH)	7
3.2. 6LoRH標頭的放置	8
4. 6LoWPAN路由標頭通用格式	9
4.1. 選擇性格式	11
4.2. 關鍵格式	11
4.3. 壓縮位址	12
5. SRH-6LoRH標頭	14
5.1. 編碼	14
5.2. SRH-6LoRH一般操作	15
5.3. 設計點彈出項	17
5.4. 6LoRH標頭入口點壓縮參考	18
5.5. 彈出式標頭	19
5.6. 轉發	20
6. RPL封包訊息6LoRH (RPI-6LoRH)	20
6.1. 壓縮RPLInstanceID	22
6.2. 壓縮SenderRank	22
6.3. 整體RPI-6LoRH編碼	23
7. IP-in-IP 6LoRH標頭	25
8. 管理注意事項	27
9. 安全考量	28
10. IANA考量	29
10.1. 6LoWPAN調度中保留空間第一頁	29
10.2. 新式關鍵6LoWPAN路由標頭類型註冊表	29
10.3. 新式選擇性6LoWPAN路由標頭類型註冊表	29
11. 參考文獻	29
11.1. 規範性參考文獻	29
11.2. 資訊參考	32
附錄A.範例	33
A.1. 壓縮RPI範例	33
A.2. 非儲存模式向下封包的範例	35
A.3. SRH-6LoRH生命週期範例	37
致謝	39

1. 前言

低功耗和有損網路 (LLNs) 的設計通常側重於節約能源，在大多數情況下，這是一種非常有限的資源。其他約束，例如有損網路設備的儲存器容量和工作循環，源於主要關注點。能量通常可從原電池獲得，預計可持續使用多年，或者從環境中清除的能量非常有限。任何旨在用於有損網路的協定必須設計為主要關注節約能源作為嚴格要求。

控制資料傳輸量是節省能源的一個可能方法。在許多有損網路標準中，訊號框大小被限制比保證 IPv6 最大傳輸單元 (MTU) 1280 位元組小得多。特別是依賴於 IEEE 802.15.4 [IEEE.802.15.4] 古典物理層 (PHY) 的有損網路限制於每訊號框 127 位元組。通過 IEEE 802.15.4 壓縮 IPv6 資料封包的需求促成“基於 IEEE 802.15.4 網路上的 IPv6 資料封包壓縮格式” [RFC6282]。

已經有創新路由技術，並且仍在開發用於有損網路內部路由。通常這種技術需要封包中的附加訊息以提供循環預防並指示諸如流水識別碼，來源於路由等訊息。

出於安全性和將 ICMPv6 錯誤訊息（請參閱“網際網路協定版本 6 (IPv6) 規範” [RFC4443] 的“網際網路控制訊息協定 (ICMPv6)”）發送回源頭的原因，原始封包不得被篡改，在 IPv6 封包中插入或刪除的任何訊息都必須放在額外的 IP-in-IP 封裝中。

當路由器在路徑上插入附加路由訊息時就是這種情況，例如，網狀的根，而不是源節點，具有“RPL：IPv6 路由低功耗和有損網路協定”的非儲存模式 [RFC6550]。

當必須從流經有損網路封包中移除一些路由訊息時也是這種情況。

“何時使用 [RFC 6553](#)、[RFC 6554](#) 和 IPv6-in-IPv6”，[\[RPL-INFO\]](#) 詳述在資料機資料封包中攜帶 RPL 訊息的 RPL 選項[\[RFC6553\]](#) 中定義 IPv6 標頭的不同情況，包含源路由的標頭在運行 RPL 的有損網路環境中，從封包中插入或刪除 RPL [\[RFC6554\]](#)和 IPv6-in-IPv6 封裝。

當使用 [RFC 6282](#) [\[RFC6282\]](#)時，IP-in-IP 封裝的外部 IP 標頭可以在無狀態壓縮中壓縮到 2 個八位元組，必須添加上下文訊息時在狀態壓縮中壓縮到 3 個八位元組。

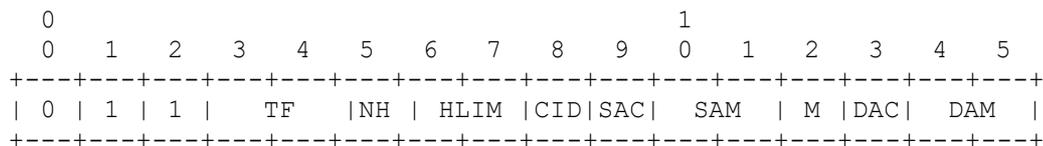


圖 1：LOWPAN_IPHC 基本編碼([RFC 6282](#))

只有在可以從媒體存取控制位址（MAC）推斷出 IPv6 位址時，才會發生 IPv6 位址的無狀態壓縮，這意味著 IP 端點也是 MAC 層端點。在 RPL 網路中通常不會有這種情況，RPL 網路通常是多點跳路由（即，在第 3 層操作）網路。基於外部封裝通常在內部分組的來源（或目的地）與根之間的事實，可以實現更好的壓縮，其不涉及取決於網格中跳的可變壓縮。此外，如果前面的所有欄位也被壓縮，則內部 IP 標頭只能由 [RFC 6282](#) [\[RFC6282\]](#)壓縮。該規範使內部 IP 標頭成為 [RFC 6282](#) [\[RFC6282\]](#)壓縮的第一個標頭，並且無論是否封裝，內部封包都以相同的方式進行編碼，從而保留現有的運行。

例如，RPL [\[RFC6550\]](#)旨在優化受約束有損網路中的路由操作。作為此優化的一部分，RPL 要求在每個封包中添加 RPL 封包訊息（RPI），如 [RFC 6550](#) [\[RFC6550\]](#)的 [第 11.2 節](#)中所定義。

“用於在資料平面資料封包中攜帶 RPL 訊息的低功耗和有損網路路由協定（RPL）選項”[\[RFC6553\]](#)規範指出 IPv6 Hop-by-Hop 標頭中如何將 RPI 放置在 RPL 選項中（RPL-OPT）。

表示總共需要 8 個位元組，而在大多數情況下，實際的 RPI 負載僅需要 19 個位元。由於 Hop-by-Hop 標頭不得流到 RPL 區域之外，因此當進入區域時必須將其插入封包中，並在離開區域時從封包中刪除。在這兩種情況下，此操作都意味著 IP-in-IP 封裝。

另外，在非儲存操作模式（MOP）的情況下，RPL 在沿 RPL 圖向下路由的所有封包中需要源路由標頭（SRH）。為此，“具有用於低功耗和有損網路（RPL）的路由協定源路由的 IPv6 路由標頭” [RFC6554] 定義用於 IPv6 的類型 3 路由標頭（RH3）。

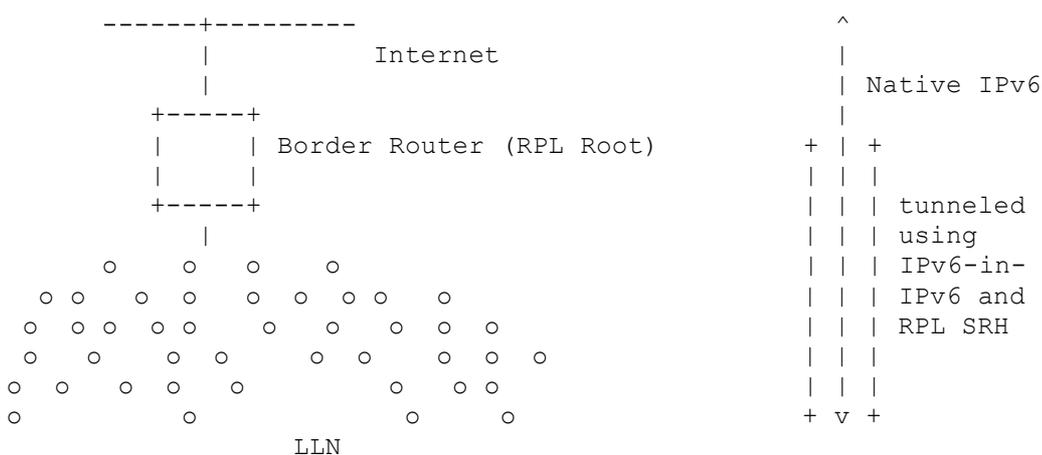


圖 2：LLN 中的 IP-in-IP 封裝

對於非儲存式 RPL，即使來源是同一有損網路中的節點，封包也必須先讓圖到達根節點，以便使根可以插入 SRH 以沿著圖形向下移動。無論以何種方式，無論封包是來自有損網路中的節點還是有損網路之外的節點，無論封包是否保留在有損網路內，只要封包的來源不是根節點本身，源路由操作也意味著在根處進行 IP-in-IP 封裝以插入 SRH。

“基於 IEEE 802.15.4 中 TSCH 模式的 IPv6 架構” [IPv6-ARCH] 規定 IPv6 在“在物聯網（IoT）：問題陳述，使用 IEEE 802.15.4e 時間同步通道跳頻（TSCH）”中描述的操作模式下操作 [RFC7554]。該架構要求在 IEEE 802.15.4 上使用 RPL 和 6lo 適配層。因為它繼承來自 MAC 層的訊號框大小限制，所以 6TiSCH 不能在 RPI 上為每個封包分配 8 個位元組，因此需要對 RPI 進行 6LoWPAN 標頭壓縮。

簡化 IP-in-IP 封裝時需要一種可擴充的壓縮技術，並最佳地壓縮 RPL LLN 中的現有路由組件。

該規範擴充 6lo 適配層框架 ([RFC4944] [RFC6282])，以便承載基於 RPL 的路由網路的路由訊息。它包括 RPL 所需的格式，並且可以擴充為其他格式。

2. 術語

在本文中的關鍵詞"必須(MUST)"、"不得(MUST NOT)"，"必要(REQUIRED)"，"必須(SHALL)"，"不得(SHALL NOT)"，"應該(SHOULD)"，"不應該(SHOULD NOT)"，"建議(RECOMMENDED)"，"不建議(NOT RECOMMENDED)"，"可以(MAY)"，"可選(OPTIONAL)"將按 RFC 2119 [RFC2119]中的描述進行解釋。

本文使用的術語與“低功耗和有損網路路由中使用的術語” [RFC7102]及 RPL [RFC6550]一致。

術語"route-over"和"mesh-under"在 RFC6775 [RFC6775]中定義。

有損網路中使用的其他術語可在"Terminology for Constrained-Node Networks"[RFC7228]中找到。

術語"byte"在現在的習慣意義上為"octet"的同義詞。

3. 使用頁面調度

” IPv6 低功耗無線個人區域網路 (6LoWPAN) 分頁調度” [RFC8025]規範通過在 6LoWPAN 解析器中引入“上下文”概念擴充 6lo 適配層框架 ([RFC4944] [RFC6282])，由頁碼識別的上上下文。規範定義 16 頁。

該文在第 1 頁內運行，由二進制 11110001 的調度值表示。

3.1. 新的路由標頭調度 (6LoRH)

該規範引入一個新的 6LoWPAN 路由標頭 (6LoRH) 來承載 IPv6 路由訊息。6LoRH 可以包含源路由訊息，例如 SRH 的壓縮形式，以及其他種類的路由訊息，例如 RPI 和 IP-in-IP 封裝。

6LoRH 在 6LoWPAN 封包中表示為類型 - 長度 - 值 (TLV) 欄位，其可擴充以供將來使用。

預計當存在 6LoRH 時，不識別第 4 節中詳述的 6LoRH 通用格式的路由器，將丟棄該封包。

該規範使用第 1 頁中的位元形態 10xxxxxx 作為新的 6LoRH 調度。第 4 節描述如何將封包中的 RPL 組件壓縮為 6LoRH 標頭。

3.2. 6LoRH 標頭的放置

3.2.1. 相對於 Non-6LoRH 標頭

在第 1 頁處於活躍狀態的封包區域中 (即，一旦解析分頁調度，直到按照 6LoWPAN 分頁調度規範[RFC8025]中的描述解析另一個分頁調度)，如果找到 6LoRH 位元模式 (參見第 3.1 節)，則解析封包必須遵循此規範。

根據此規範，6LoRH 調度僅在第 1 頁中定義，因此必須將其放置在上下文處於活躍狀態區域的封包中。

因為 6LoRH 標頭需要一個第 1 頁上下文，所以它必須始終放在 RFC 4944 [RFC4944] 中定義的任何 Fragmentation 標頭和/或 Mesh 標頭之後。

必須始終將 6LoRH 標頭放在 RFC 6282 [RFC6282] 中定義的 LOWPAN_IPHC 之前。它的設計方式是，放置或刪除使用 6LoRH 編碼的標頭不會修改使用 LOWPAN_IPHC 編碼的封包部分，無論是否存在 IP-in-IP 封裝。例如，無論是否存在路由標頭，封包的最終目的地始終是 LOWPAN_IPHC 中的目的地。

3.2.2. 相對於其他 6LoRH 標頭

“網際網路協定，版本 6 (IPv6) 規範” [RFC2460] 定義由 IPv6 標頭引入並由另一 IPv6 標頭 (IP-in-IP) 或上層協定 (ULP) 標頭終止的標頭鏈。當從封包中剝離外部標頭時，整個鏈結隨之而來。當中間路由器插入一個或多個標頭時，該路由器通常鏈接標頭並將結果封裝在 IP-in-IP 中。

根據此規範，標頭鏈必須按照它們在未壓縮形式的封包中出現的順序進行壓縮。這意味著如果存在多個巢狀 IP-in-IP 封裝，則先以壓縮形式對第一個 IP-in-IP 封裝及其所有標頭鏈進行編碼。

在內部 IPv6 標頭之後具有源路由或 Hop-by-Hop (HbH) 選項標頭 [RFC2460] 的封包壓縮形式 (例如，如果沒有 IP-in-IP 封裝)，在表示 IPv6 標頭的 6LOWPAN_IPHC 之前，這些標頭放置在 6LoRH 格式中 (參見第 3.2.1 節)。如果此封包被封裝且某些 SRH 或 HbH 選項標頭被添加為封裝的一部分，則將 6LoRH 標頭彼此相鄰放置可能會對哪個標頭屬於未壓縮形式的哪個鏈存在歧義。

為了消除來自外部 IP-in-IP 標頭中未壓縮格式的內部 IPv6 標頭歧義，需要將壓縮的 IP-in-IP 標頭放在編碼鏈的最後。這意味著在解壓縮封包時使用 6LOWPAN_IPHC 編碼的 IPv6 標頭之後插入在最後一個壓縮的 IP-in-IP 標頭後找到的 6LoRH 標頭。

關於 SRH 和 RPI 在壓縮形式中的相對位置，本規範的設計點是當封包沿著 LLN 向下進行時消耗 SRH 入口點 (參見第 5.3 節)。為了使該操作在壓縮形式中更簡單，需要在壓縮形式中，沿著源路由路徑位址按路徑的順序編碼，並且壓縮的 SRH 放置在壓縮的 RPI 之前。

4. 6LoWPAN 路由標頭通用格式

6LoRH 使用第 1 頁中的 10xxxxxx 的調度值位元型樣。

調度值位元型樣分為兩種形式的 6LoRH：

選擇性 (6LoRHE)，如果不理解可能會跳過

關鍵性 (6LoRHC) ，可能不被忽略

對於每個形式，類型欄位用於編碼 6LoRH 的類型。

請注意，每種形式的 6LoRH 的 Type 欄位都有不同的註冊表。

這意味著一種形式的 6LoRH 定義的類型值，在將來可能會被另一種形式重新定義。

4.1. 選擇性格式

6LoRHE 使用 101xxxxx 的調度值位元型樣。可以忽略 6LoRHE 並在解析時跳過。如果忽略，則轉發 6LoRHE 時 LLN 內部不會有任何變化。

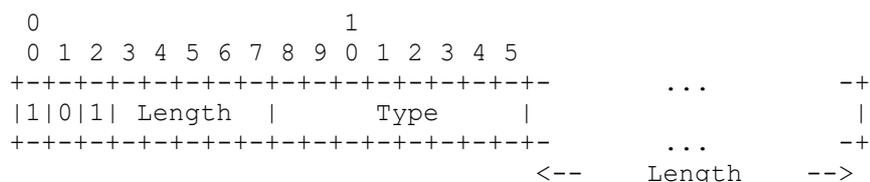


圖 3：選擇性 6LoWPAN 路由標頭

Length(長度)：6LoRHE 的長度，以位元組為單位，不包括前 2 個位元組。這使得節點可以跳過它不支援及/或無法解析的 6LoRHE 標頭，例如，如果類型無法識別。

類型：6LoRHE 的類型

4.2. 關鍵格式

6LoRHC 使用 100xxxxx 的調度值位元型樣。

不支援 6LoRHC 類型的節點必須以靜默方式丟棄該封包。

注意：節點收到帶有不可解讀的關鍵 6LoWPAN 路由標頭訊息之情況不應該發生，並且是管理錯誤，請參閱第 8 節。

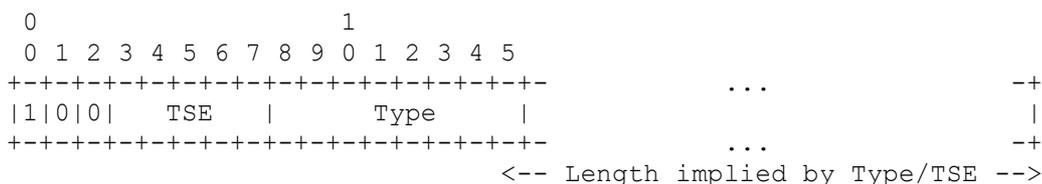


圖 4：關鍵 6LoWPAN 路由標頭

特定類型擴充 (TSE)：含義取決於類型，必須在所有節點中得知。TSE 的解釋取決於後面的類型欄位。例如，它可以用於傳輸控制位元，陣列中元素的數量，或者以位元組以外的單位表示 6LoRHC 的剩餘部分的長度。

類型：6LoRHC 類型

4.3. 壓縮位址

本文中用於壓縮位址的一般技術首先確定與該位址具有長前綴匹配的引用，然後忽略該匹配的片段。為了重建壓縮位址，接收節點將執行第 4.3.1 節中描述的合併過程。

一個可能的參考是正在走訪 RPL 目標定向有向無環圖 (DODAG) 的根。在 IP-in-IP 封裝的情況下，6LoRH 將其用於壓縮外部 IP 標頭的參考。如果根是封包的來源，則該技術允許人們以壓縮形式的 IP 標頭完全忽略源位址。如果根不是封裝器，那麼仍然可以使用根作為引用來壓縮封裝位址。第 4.3.2 節討論如何確定根的位址。

一旦確定封包來源的位址，它就成為位於壓縮 SRH 標頭中位址壓縮的參考，該壓縮 SRH 標頭以未壓縮形式存在於 IP-in-IP 封裝內。

4.3.1. 合併

通過用壓縮位址覆蓋參考位址的 N 個最右邊位元組，IPv6 壓縮位址與參考位址合併，其中 N 是壓縮位址的長度，如圖 7 中 SRH-6LoRH 標頭的類型所示。

參考位址也可以是壓縮位址，在這種情況下，它必須以與正在合併的位址相等或更大的長度形式進行壓縮。

通過將其與參考位址合併來擴充壓縮位址。在類型 4 SRH-6LoRH 的特定情況下，位址以完整表示，並且合併是完全覆蓋，如圖 5 所示。

RRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRR	A reference address, which may be compressed or not
CCCCCCC	A compressed address, which may be shorter or the same as the reference
RRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRCCCCCCC	A coalesced address, which may be the same compression as the reference

圖 5：合併位址

4.3.2. DODAG 根位址判定

有狀態位址壓縮要求在設備中安裝某些狀態以儲存從封包中省略的壓縮訊息。該狀態儲存在摘要的上下文表格中，並且在封包中找到一些形式的索引以獲得上下文表格中的壓縮訊息。

使用 [RFC 6282 \[RFC6282\]](#)，狀態由 6LoWPAN 鄰居發現協定 (NDP) [\[RFC6775\]](#) 提供給堆疊。NDP 通過路由器廣告 (RA) 訊息中的 6LoWPAN 上下文選項交換上下文。在封包的壓縮形式中，可以在上下文識別符擴充中用信號通知上下文。

利用該規範，壓縮資訊由 RPL 提供給堆疊，並且 RPL 藉由 DAG 資訊物件 (DIO) 訊息中的 DODAGID 欄位交換它，下方會有更詳細地描述。在封包的壓縮形式中，可以通過 RPI 中的 RPLInstanceID 來發信號通知上下文。

使用 RPL [\[RFC6550\]](#)，可以從 DIO 訊息的 DODAGID 欄位獲知 DODAG 根的位址。對於全局實例而言，RPI 中存在的 RPLInstanceID 足以識別此節點參與的 DODAG 及其關聯的根。但是，對於本地實例，根的位址必須是明確的，無論是在某些設備配置中還是在封包中發出信號，分別作為源位址或目標位址。

隱式時，DODAG 根的位址必須確定如下：

如果整個網路是單個 DODAG，則根可以是眾所周知的，並且不需要在封包中用信號通知。但是，由於 RPL 不公開該屬性，因此只能通過應用於所有節點的配置來得知它。

到最後一個做排序。

給定 SRH-6LoRH 標頭中的所有位址必須以相同的方式壓縮，因此壓縮形式的長度對於所有位址才會是相同的。

為了獲得不同程度的壓縮，必須使用多個連續的 SRH-6LoRH 標頭。

類型 0 表示位址壓縮到一個位元組，而類型 4 表示位址在 SRH-6LoRH 中完全提供，沒有壓縮。

圖 7 中提供 SRH-6LoRH 類型的完整列表和相應的壓縮級別：

6LoRH Type	Length of compressed IPv6 address (bytes)
0	1
1	2
2	4
3	8
4	16

圖 7：SRH-6LoRH 類型

在 SRH-6LoRH 標頭的情況下，TSE 欄位用作大小為其編碼跳數減 1；所以大小為 0 表示經一次跳，可編碼的最大值為經 32 次跳。（如果需要表示超過 32 次跳，則可以使用一系列 SRH-6LoRH 元素。）結果為 SRH-6LoRH 標頭的長度（以位元組為單位）：

$$2 + \text{Length_of_compressed_IPv6_address} * (\text{Size} + 1)$$

5.2. SRH-6LoRH 一般操作

5.2.1. 未壓縮 SRH 操作

在未壓縮的形式中，當根在非儲存模式下生成或轉發封包時，它需要包含源路由標頭[RFC6554]以向 DODAG 下方的最終目的地發送嚴格限制的源路由路徑信號。

除了第一個之外，路徑上的所有的跳都按順序編碼在 SRH 中。SRH 的最後一個入口點是最終目的地； IPv6 標頭中的目的地是

沿源路由路徑的第一個跳。中間的跳執行交換，左段欄位指示路由標頭[RFC2460]中的活躍入口點。

封包的當前目的地，即當前段的終止，始終由 IPv6 標頭的目標位址指示。

5.2.2.2. 6LoRH 壓縮 SRH 操作

SRH-6LoRH 的處理是不同的：沒有交換，並且在接收到封包時，與第一個 SRH-6LoRH 中的第一個入口點相對應之轉發路由器在轉發時有效地消耗該入口點。這意味著壓縮的源路由封包的大小隨著封包沿其路徑前進而減小，並且路由訊息在此過程中丟失。這也意味著用 6LoRH 編碼的 SRH 不可恢復且無法保護。

當使用此規範進行壓縮時，必須在一個或多個連續的 SRH-6LoRH 標頭中按順序編碼所有剩餘的跳。無論是否存在 SRH-6LoRH 標頭，最終目的地的位址始終在路徑裡的 LOWPAN_IPHC 中指示。[附錄 A](#) 提供這方面的示例。

壓縮源路由封包的當前目的地（當前段的終止）在第一個 SRH-6LoRH 的第一個入口點中指示。在嚴格的源路由中，該入口點必須匹配接收封包的路由器位址。

最後一個 SRH-6LoRH 中的最後一個入口點是到達 LLN 中最終目的地的最後一個路由器。如果希望一直攜帶整個 IP-in-IP 封裝，則該路由器可以是最終目的地。否則，它是最終目的地 RPL 的父級，或者作為目標主機 6LoWPAN 路由器（6LR）[RFC6775]的路由器，並且它將主機作為外部路由廣播給 RPL。

如果 SRH-6LoRH 標頭包含在 IP-in-IP 封裝中，則最後一個路由器將刪除整個標頭鏈。否則，它僅刪除 SRH-6LoRH 標頭。

5.2.2.3. 內部 LOWPAN_IPHC 壓縮

6LoWPAN ND [RFC6282]旨在為每個節點和每個介面識別符(IID)支援多個 IPv6 位址；通常從 MAC 位址導出 IID 以優化 LOWPAN_IPHC 壓縮。

連結本地位址使用無狀態位址壓縮 ($S/DAC = 0$) 進行壓縮。其他位址來自不同的前綴，並且可以基於上下文 ($S/DAC = 1$) 使用有狀態位址壓縮來壓縮它們。

但是，無狀態壓縮僅針對特定的連結本地前綴定義，而不是封裝標頭中的前綴。通過有狀態壓縮，壓縮參考可以在上下文中找到，而不是封裝標頭。

結果是，在 IP-in-IP 封裝的情況下，只有在有狀態（根據上下文）壓縮的使用過情況下，才可以基於封裝 IP 標頭壓縮 LOWPAN_IPHC 中的內部來源（相應目的地）IP 位址。僅當外部和內部標頭中的來源（相應目標）IP 位址中的 IID 匹配時，壓縮才會運行，這通常意味著它們參考同一節點。這被編碼為 $S/DAC = 1$ 和 $S/AM = 11$ 。必須注意的是，用於壓縮內部目標位址的外部目標位址是最後一個 SRH-6LoRH 標頭中的最後一個入口點。

5.3. 設計點彈出項

為了節省能源並優化有損媒體上傳成功的機會，本規範的設計要點是從封包中刪除已使用 SRH 的入口點。這造成與 IPv6 技術的差異，其中路由標頭是可變但可恢復的。

根據此規範，封包可以在任何一個跳擴充為有效的 IPv6 封包，包括 SRH，並進行壓縮。

但是，一路上解壓縮的封包將不會攜帶封包在未壓縮格式轉發時所擁有的所有消耗位址。

值得注意的是：

將整個 RH 保持在 IPv6 標頭中的值是接收器將其反轉，得以在返回途中使用對稱路徑。

反轉路由標頭通常不是一個好主意。RH 可能已被用於遠離最短路徑，因為某些原因僅在路段（段路由）中有效。

在目前的 RPL 規範中沒有用於反轉 RH。

點對點(P2P)RPL 反轉路徑，其被動學習協定操作的一部分，這可能比資料路徑上的反向回波更清晰。

對於重新定向標頭選項 (RHO)，不鼓勵 (通過 [RFC 2460](#) [[RFC2460](#)]) 反轉標頭，除非它經過身份驗證，這需要一個身份驗證標頭 (AH)。對於 SRH 沒有 AH 操作的定義，並且沒有跡象表明 LLN 中存在需求。

AH 在途中不保護 RH。AH 是接收器的驗證，其唯一功能是使接收器能夠反轉它。

RPL 區域通常受 L2 安全性保護，L2 安全性在每一個跳都保護 RPL 本身和封包中的 RH。這比 AH 提供的安全性更好。

總之，與可能反轉標頭的值相比，透過在 LLN 上發送較小訊號框來節省能量和降低丟失機會的好處被認為是壓倒性。

5.4. 6LoRH 標頭入口點壓縮參考

為了優化 SRH 標頭中 IP 位址的壓縮，該規範要求 6LoWPAN 層識別用作壓縮參考的位址。

根據此規範，在 SRH 標頭中找到的第一個位址的壓縮參考是 IPv6 封包的來源，然後每個隨後的入口點的參考是其前一個未壓縮的位址。

對於 RPL [[RFC6550](#)]，SRH 標頭可能僅存在於非儲存模式，並且它可能僅由 DODAG 的根存放在封包中，DODAG 必須是生成 IPv6 封包的來源 [[RFC2460](#)]。在這種情況下，用作壓縮參考的位址是根的位址。

壓縮參考必須由以下確定：

可以通過配置獲得參考位址。該配置可以指示完整的位址或攜帶位址的 6LoWPAN 上下文之識別符 [[RFC6775](#)]，例如，LOWPAN_IPHC 中使用 16 個上下文識別符之一 [[RFC6282](#)]。

否則，如果沒有 IP-in-IP 封裝，則使用 LOWPAN_IPHC 壓縮的 IPv6 標頭中的源位址是壓縮的參考。

否則，如果使用本文中指定的 IP-in-IP 壓縮並提供封裝位址，則封裝位址是作為參考。

否則，意味著使用本文中指定的 IP-in-IP 壓縮，並且封裝器是隱式的根，根的位址則作為參考。

5.5. 彈出式標頭

在接收時，路由器檢查第一個 SRH-6LoRH 的第一個入口點中的位址是否是自己的位址之一。如果是，這時路由器必須在轉發之前使用該入口點，這是從堆疊彈出的動作，其中堆疊實際上是連續 SRH-6LoRH 標頭中的入口點序列。

彈出 SRH-6LoRH 標頭的入口點是一個遞迴操作，執行如下：

如果當前 SRH-6LoRH 標頭的大小為 1 或更大（表示標頭中至少有 2 個入口點），則路由器刪除第一個入口點並將大小減 1。

如果當前 SRH-6LoRH 標頭的大小為 0（表示標頭中只有 1 個入口點）並且沒有隨後的 SRH-6LoRH，則刪除當前的 SRH-6LoRH。

如果當前 SRH-6LoRH 標頭的大小為 0 且有隨後的 SRH-6LoRH 及隨後的 SRH-6LoRH 類型等於或大於當前 SRH-6LoRH 標頭的類型（表示相同或更小的壓縮產生相同或更大的壓縮形式），然後移除當前的 SRH-6LoRH。

如果當前 SRH-6LoRH 標頭的大小為 0 且有隨後的 SRH-6LoRH 及隨後的 SRH-6LoRH 類型小於當前 SRH-6LoRH 標頭的類型，則隨後的 SRH-6LoRH 第一個入口點會被移除並與當前 SRH-6LoRH 的第一個入口點合併。

在該過程結束時，如果封包中不再有 SRH-6LoRH，則處理節點是源路由路徑上的最後一個路由器。

附錄 A.3 中提供此操作的示例。

5.6. 轉發

當收到帶有 SRH-6LoRH 的封包時，路由器會確定當前網段端點的 IPv6 位址。

如果強制執行嚴格的源路由且此路由器不是封包的段端點，則此路由器必須丟棄該封包。

如果強制執行嚴格的源路由且此路由器不是封包的段端點，則此路由器必須丟棄該封包。

如果仍有 SRH-6LoRH，則路由器確定新的段端點並將封包發送到該端點。

否則，路由器使用內部 IP 標頭中的目的地來轉發或接收封包。

封包的段端點必須由以下確定：

路由器首先確定壓縮參考，如第 4.3.1 節中所述。

然後，路由器將壓縮參考與第一個 SRH-6LoRH 標頭的第一個入口點合併，如第 5.4 節所述。如果 SRH-6LoRH 標頭是類型 4，則合併是完全覆蓋。

由於壓縮參考是未壓縮的位址，因此合併的 IPv6 位址也以完整的 128 位元表示。

6. RPL 封包訊息 6LoRH (RPI-6LoRH)

RPL 文件[RFC6550]的第 11.2 節將 RPL 封包資訊 (RPI) 指定為一組欄位，這些欄位由 RPL 路由器放置在 IP 封包中以識別 RPL 實例，檢測異常並觸發糾正機制。

特別是，SenderRank 是由諸如 [RFC 6552 \[RFC6552\]](#) 中描述的專用目標函數計算的標量度量，其指示發送者的級別並且在每一個跳處被修改。SenderRank 欄位用於驗證封包沿著 DODAG 在預期方向（向上或向下）前進。

RPL 定義“用於在資料平面資料封包中攜帶 RPL 訊息的低功耗和有損網路的路由協定（RPL）選項”[\[RFC6553\]](#)來傳輸 RPI，其在 IPv6 Hop-by-Hop 選項標頭中攜帶[\[RFC2460\]](#)，通常每個封包消耗 8 個位元組。

使用 [RFC 6553 \[RFC6553\]](#)，RPL 選項被編碼為 6 個八位元組，必須放置在 Hop-by-Hop 的標頭中，該標頭消耗兩個額外的八位元組，總共 8 個八位元組。為了將標頭的範圍限制為僅 RPL 區域，必須將 Hop-by-Hop 標頭添加到跨越 RPL 區域邊界的封包中（或從中移除）。

8 位元組消耗對 LLN 操作是有害的，特別是在頻寬和電池限制方面。這些位元組可能導致包含訊號框增長到最大框架以上，導致第 2 層或 6LoWPAN [\[RFC4944\]](#) 片段，這反過來導致更多的能量消耗和“LLN 片段轉發及恢復”[\[FORWARD-FRAG\]](#) 中討論的問題。

在某些情況下，需要額外的消耗來添加 IP-in-IP 封裝以攜帶 Hop-by-Hop 標頭。當插入 Hop-by-Hop 標頭的路由器不是封包的來源時，需要這樣做，以便可以將錯誤返回給路由器。當必須從 Hop-by-Hop 標頭中剝離由 RPL 節點發起的封包，使其在 RPL 區域之外發送時，也是這種情況。

因此，本規範在第 7 節中定義 IP-in-IP-6LoRH 標頭，但必須注意的是，刪除 6LoRH 標頭不需要在 LOWPAN_IPHC 中操作封包，因此，如果源位址在 LOWPAN_IPHC 是插入 IP-in-IP-6LoRH 標頭的節點，這種情況本身並不強制 IP-in-IP-6LoRH 標頭。

注意：發現某些運行省略在非儲存模式下沿 RPL 圖向下封包的 RPI，即使 RPL 指示應將 RPI 放入封包中。根據此規範，RPI 對於指示 RPLInstanceID 很重要，因此不應省略 RPI。

結論，RPL 封包可能僅承載 RPI-6LoRH 標頭而沒有 IP-in-IP-6LoRH 標頭。在這種情況下，封包的來源和目的地由 LOWPAN_IPHC 指定。

與 RFC 6553 [RFC6553] 一樣，RPI 中的欄位包括 “O”，“R” 和 “F” 位元，8 位元的 RPLInstanceID（具有一些內部結構）和 16 位元的 SenderRank。

本節的其餘部分定義 RPI-6LoRH 標頭，它是一個關鍵的 6LoWPAN 路由標頭，旨在傳輸 6LoWPAN LLN 中的 RPI。

6.1. 壓縮 RPLInstanceID

RPL 實例在 RPL 規範[RFC6550]的第 5 節中討論。許多簡單用例不需要多個 RPL 實例，在這種情況下，RPL 實例應該是全域實例 0。全域 RPLInstanceID 在 RPLInstanceID 欄位中編碼，如下所示：

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

圖 8：全域實例的 RPLInstanceID 段格式

對於全域實例 0 的特定情況，RPLInstanceID 欄位全為零。此規範允許壓縮器忽略全部為零的 RPLInstanceID 欄位並定義 I 標誌，該標誌在設置時表示該欄位被省略。

6.2. 壓縮 SenderRank

SenderRank 是發送者等級上 DAGRank 操作的結果；在此，DAGRank 操作於 RPL 規範[RFC6550]的第 3.5.1 節中定義為：

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

如果將 MinHopRankIncrease 設置為 256 的倍數，則 SenderRank 的最低 8 位元將全為零；通過刪除它們，SenderRank 可以壓縮成單個位元組。這個想法在 RFC 6550 [RFC6550]中使用，通過將 DEFAULT_MIN_HOP_RANK_INCREASE 定義為 256，並在 RFC

6552 [RFC6552] 中使用，默認 MinHopRankIncrease 為 DEFAULT_MIN_HOP_RANK_INCREASE。

此規範允許將 SenderRank 編碼為 1 或 2 個位元組，並定義 K 標誌，該標誌在設置時表示使用單個位元組。

6.3. 整體 RPI-6LoRH 編碼

RPI-6LoRH 標頭為 RPL RPI 提供壓縮格式。需要轉發帶有 RPI-6LoRH 標頭封包的路由器應該是支援該規範的 RPL 路由器。

如果非 RPL 路由器收到帶有 RPI-6LoRH 標頭的封包，則會出現路由或配置錯誤（參見第 8 節）。

對非 RPL 路由器的期望反應是丟棄封包而不是跳過標頭並轉發封包，最後可能通過在錯誤的 RPL 實例中重新註入封包而形成迴圈。

SRH-6LoRH 標頭的調度值位元型樣表示它是關鍵的。了解第 4 節中詳述的 6LoRH 通用格式之路由器不能忽略此類型的 6LoRH 標頭，如果它們不認識則將丟棄該封包。

由於 RPI-6LoRH 標頭是關鍵標頭，因此 TSE 欄位不需要是以位元組表示的長度。該欄位完全重用於編碼來自 RPI 的 O、R 和 F 標誌的控制位元，以及指示壓縮格式的 I 和 K 標誌。

RPI-6LoRH 是類型 5。

RPI-6LoRH 標頭後面緊跟 RPLInstanceID 欄位，除非該欄位被完全省略，接著是 SenderRank，它被壓縮成一個位元組或完全直列為 2 個位元組。RPI-6LoRH 頭中的 I 和 K 標誌指示 RPLInstanceID 是否被省略和/或 SenderRank 是否被壓縮。根據這些位元，RPI-6LoRH 的長度可以如下所述變化。

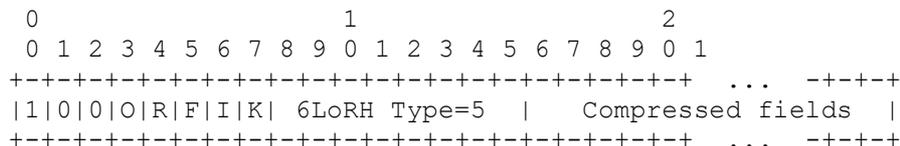


圖 9：通用 RPI-6LoRH 格式

O、R 和 F 位元：O、R 和 F 位在 RFC 6550 [RFC6550] 的第 11.2 節中定義。

I 標記：如果它被設置，則 RPLInstanceID 會被刪除，RPLInstanceID 是全域 RPLInstanceID 0。如果未設置，則緊跟在 Type 欄位之後的八位元組包含 RFC 6550 [RFC6550] 的第 5.1 節中指定的 RPLInstanceID。

K 標誌：如果它被設置，SenderRank 被壓縮為 1 個八位元組，最低有效八位元組被省略。如果未設置，則 SenderRank 完全直列為 2 個八位元組。

在圖 10 中，RPLInstanceID 是全域 RPLInstanceID 0，MinHopRankIncrease 是 256 的倍數，因此最低有效位元組全部為零，可以省略：

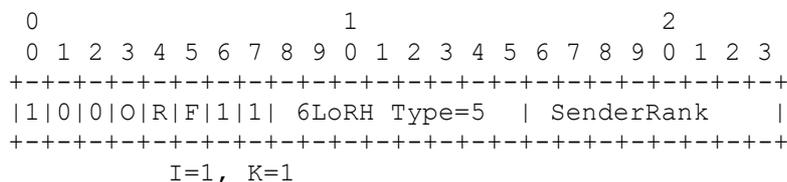


圖 10：最壓縮 RPI-6LoRH

在圖 11 中，RPLInstanceID 是全域 RPLInstanceID 0，但 SenderRank 的兩個位元組都很重要，因此無法壓縮：

封裝還可以使目的地之前的最後一個路由器刪除諸如 RPI 之類的欄位，但是這可以通過刪除 RPI-6LoRH 以壓縮形式完成，出於這個唯一目的，因此不需要 IP-in-IP-6LoRH 封裝。

SRH-6LoRH 標頭的調度值位元型樣表明它是選擇性的。此欄位對於路由並不重要，因為它不會指示封包的目的地，該封包在 SRH-6LoRH 標頭或內部 IP 標頭中編碼。如果不理解，可以跳過這種類型的 6LoRH 標頭（根據第 4 節），6LoRH 標頭指示長度（以位元組為單位）。

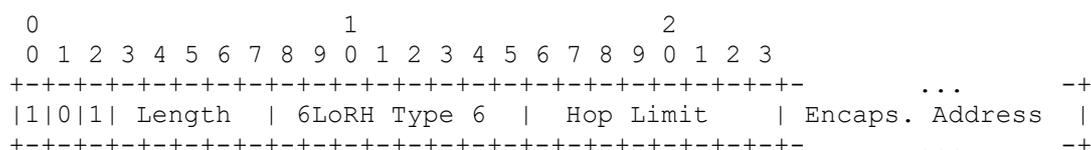


圖 14：IP-in-IP 6LoRH

IP-in-IP-6LoRH 標頭的長度以位元組表示，並且必須至少為 1，以指示在每一跳遞減的跳躍限制（HL）。當 HL 達到 0 時，根據 [RFC 2460 \[RFC2460\]](#) 丟棄封包。

如果 IP-in-IP-6LoRH 標頭的長度恰好為 1，那麼將省略封裝器位址，這意味著封裝器是眾所周知的路由器，例如 RPL 圖中的根。

當封包的端點是與用於轉發封包之 RPL 實例關聯的 RPL DODAG 的根，以及根位址是隱式已知時，可以獲得使用此規範可以實現的 IP-in-IP 封裝之最有效壓縮，而不是在封包中明確地發信號通知。

如果 IP-in-IP-6LoRH 標頭的長度大於 1，則在跳限制欄位之後以壓縮形式放置封裝器位址。長度的值表示對封裝器位址執行的壓縮。例如，長度為 3 表示封裝器位址被壓縮為 2 個位元組。壓縮的參考是 DODAG 的根位址。[第 4.3.2 節](#) 討論決定根位址的方式。

使用 RPL，IP-in-IP 標頭中的目的地位址隱含地是 RPL 圖中用於向上發送封包的根；在儲存模式下，它是 LOWPAN_IPHC 中用

於向下傳輸封包的目的地地址。在非儲存模式下，封包向下發送沒有隱含值。

如果隱含值正確，則可以省略 IP-in-IP 封裝的目的地 IP 地址。否則，IP-in-IP 標頭的目的地 IP 地址在 SRH-6LoRH 標頭中傳輸，作為第一個標頭的第一個入口點。

如果封包的最終目的地是不支援此規範的節點，那麼 6LoRH 標頭鏈必須被附加節點的 RPL / 6LR 路由器剝離。在該示例中，不能省略 IP-in-IP 標頭的目的地 IP 地址。

在使用 6LoRH 標頭來發送 6LoWPAN 段的特殊情況下，所有段上的 LOWPAN_IPHC 都無法訪問目的地地址，並且只能為第一個段和向上的封包省略目的地地址。

8. 管理注意事項

儘管可以在任何一個跳上解壓縮封包，但是此規範已經過優化，以便能夠以壓縮形式一直轉發封包，並且在所有節點或完全沒有節點的情況下部署同構網路是有意義的。使用其中詳述的壓縮技術。

該規範旨在受約束節點中運行簡單實現，因此它確實期望同構網路，它不提供在轉發時決定下一個跳的支援級別方法。

如果本規範的擴充提供這樣的方法，轉發節點可以適當地壓縮或解壓縮 RPL 組件，並且在支援該規範的節點和不支援該規範的節點之間實現向後兼容。

結果是該規範不試圖實現這種向後兼容性。它不需要外部代碼來交換和處理錯誤訊息以自動糾正不匹配情況。

當預期封包攜帶 6LoRH 標頭但不發送時，發現該問題的節點應該向根節點發送 ICMPv6 錯誤訊息。它應該以適應的速率限制和類型 4（表示“參數問題”）及代碼 0（表示“遇到未識別的下一個標頭欄位”）發送。應該嵌入所接收封包的相關部分，並且應該指出其中預期 6LoRH 標頭的偏移。

當收到帶有無法識別的 6LoRH 標頭封包時，發現該問題的節點應該向根節點發送 ICMPv6 錯誤訊息。它應該以適應的速率限制和類型 4（表示“參數問題”）和代碼 1（表示“遇到未識別的下一個標頭類型”）發送。應該嵌入所接收封包的相關部分，並且應該指出其中預期 6LoRH 標頭的偏移。

在這兩種情況下，節點不應該在結果訊息中放置本規範中定義的 6LoRH 標頭，且節點應該省略 RPI 或在 IPv6 標頭之後將其解壓縮。

此外，在這兩種情況下，可能優先選擇備用管理方法，以便通知網路管理員存在配置錯誤。

通過將所有設備配置為使用或不使用某種級別的此壓縮技術及其未來添加，保持網路同質是部署問題，僅部署具有相同功能的設備或管理問題。

特別是，節點接收到具有其不理解的關鍵 6LoWPAN 路由標頭訊息的情況是管理錯誤，其中錯誤的設備被放置在網路中，或者設備配置錯誤。

當檢測到不匹配情況時，預期設備引發一些指示問題的管理警報，例如，它必須丟棄具有關鍵 6LoRH 的封包。

9. 安全考量

[RFC 4944 \[RFC4944\]](#)、[RFC 6282 \[RFC6282\]](#) 及 [RFC 6553 \[RFC6553\]](#)的安全考量應用。

使用壓縮格式而不是完整的串聯格式在邏輯上是等價的，並且與 [RFC 6550 \[RFC6550\]](#)、[RFC 6553 \[RFC6553\]](#)及 [RFC 6554 \[RFC6554\]](#)相比，被認為不會因新威脅新增而開放，需注意即使中間跳在消耗時從 SRH 標頭中刪除，節點仍然可以識別源路由路徑的其餘部分是否包含迴圈（參見 [RFC 6554](#) 的“安全性”部分）。必須注意的是，如果攻擊者不是迴圈的一部分，那麼迴圈開始時總會有一個節點可以檢測並刪除它。

10. IANA 考量

10.1. 6LoWPAN 調度中保留空間第一頁

該規範保留 6LoWPAN 調度第 1 頁中的調度值位元型樣，如下所示：

10 1xxxxx: for Elective 6LoWPAN RoutingHeaders

10 0xxxxx: for Critical 6LoWPAN RoutingHeaders

此外，本文還創建兩個 IANA 註冊管理機構：一個用於關鍵 6LoWPAN 路由標頭類型，另一個用於選擇性 6LoWPAN 路由標頭類型，每個註冊表具有 256 個可能的值，從 0 到 255，如下所述。

IANA 將使用 “RFC Required” 程序[\[RFC5226\]](#)進行未來的分配。

10.2. 新式關鍵 6LoWPAN 路由標頭類型註冊表

本文創建一個名為 “關鍵 6LoWPAN 路由標頭類型” 的 IANA 註冊中心，並分配以下值：

0-4: SRH-6LoRH [\[RFC8138\]](#)

5: RPI-6LoRH [\[RFC8138\]](#)

10.3. 新式選擇性 6LoWPAN 路由標頭類型註冊表

本文創建一個名為 “選擇性 6LoWPAN 路由標頭類型” 的 IANA 註冊中心，並分配以下值：

6: IP-in-IP-6LoRH [\[RFC8138\]](#)

11. 參考文獻

11.1. 規範性參考文獻

[IEEE.802.15.4] IEEE, "IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks", IEEE 802.15.4-2015, DOI

10.1109/IEEESTD.2016.7460875,
<<http://ieeexplore.ieee.org/document/7460875/>>.

[RFC2119] Bradner, S., "Key words for use in RFCs to Indicate Requirement Levels", [BCP 14](#), [RFC 2119](#),

DOI 10.17487/RFC2119, March 1997,
<<http://www.rfc-editor.org/info/rfc2119>>.

[RFC2460] Deering, S. and R. Hinden, "Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification", [RFC 2460](#), DOI 10.17487/RFC2460,

December 1998, <<http://www.rfc-editor.org/info/rfc2460>>.

[RFC4443] Conta, A., Deering, S., and M. Gupta, Ed., "Internet Control Message Protocol (ICMPv6) for the Internet Protocol Version 6 (IPv6) Specification", [RFC 4443](#), DOI 10.17487/RFC4443, March 2006,
<<http://www.rfc-editor.org/info/rfc4443>>.

[RFC4944] Montenegro, G., Kushalnagar, N., Hui, J., and D. Culler, "Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks", [RFC 4944](#), DOI 10.17487/RFC4944, September 2007,
<<http://www.rfc-editor.org/info/rfc4944>>.

- [RFC5226] Narten, T. and H. Alvestrand, "Guidelines for Writing an IANA Considerations Section in RFCs", [BCP 26](#), [RFC 5226](#), DOI 10.17487/RFC5226, May 2008, <<http://www.rfc-editor.org/info/rfc5226>>.
- [RFC6282] Hui, J., Ed. and P. Thubert, "Compression Format for IPv6 Datagrams over IEEE 802.15.4-Based Networks", [RFC 6282](#), DOI 10.17487/RFC6282, September 2011, <<http://www.rfc-editor.org/info/rfc6282>>.
- [RFC6550] Winter, T., Ed., Thubert, P., Ed., Brandt, A., Hui, J., Kelsey, R., Levis, P., Pister, K., Struik, R., Vasseur, JP., and R. Alexander, "RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks", [RFC 6550](#), DOI 10.17487/RFC6550, March 2012, <<http://www.rfc-editor.org/info/rfc6550>>.
- [RFC6552] Thubert, P., Ed., "Objective Function Zero for the Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL)", [RFC 6552](#), DOI 10.17487/RFC6552, March 2012, <<http://www.rfc-editor.org/info/rfc6552>>.
- [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](#), DOI 10.17487/RFC6553, March 2012, <<http://www.rfc-editor.org/info/rfc6553>>.
- [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](#), DOI 10.17487/RFC6554, March 2012, <<http://www.rfc-editor.org/info/rfc6554>>.

[RFC8025] Thubert, P., Ed. and R. Cragie, "IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Network (6LoWPAN) PagingDispatch", [RFC 8025](#), DOI 10.17487/RFC8025, November 2016, <<http://www.rfc-editor.org/info/rfc8025>>.

11.2. 資訊參考

[FORWARD-FRAG]

Thubert, P., Ed. and J. Hui, "LLN Fragment Forwarding and Recovery", Work in Progress, [draft-thubert-6lo-forwarding-fragments-05](#), April 2017.

[IPv6-ARCH]

Thubert, P., Ed., "An Architecture for IPv6 over the TSCH mode of IEEE 802.15.4", Work in Progress, [draft-ietf-6tisch-architecture-11](#), January 2017.

[RFC6775] Shelby, Z., Ed., Chakrabarti, S., Nordmark, E., and C. Bormann, "Neighbor Discovery Optimization for IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs)", [RFC 6775](#), DOI 10.17487/RFC6775, November 2012, <<http://www.rfc-editor.org/info/rfc6775>>.

[RFC7102] Vasseur, JP., "Terms Used in Routing for Low-Power and Lossy Networks", [RFC 7102](#), DOI 10.17487/RFC7102, January 2014, <<http://www.rfc-editor.org/info/rfc7102>>.

[RFC7228] Bormann, C., Ersue, M., and A. Keranen, "Terminology for Constrained-Node Networks", [RFC 7228](#), DOI 10.17487/RFC7228, May 2014, <<http://www.rfc-editor.org/info/rfc7228>>.

[RFC7554] Watteyne, T., Ed., Palattella, M., and L. Grieco, "Using IEEE 802.15.4e Time-Slotted Channel Hopping (TSCH) in the Internet of Things (IoT): Problem Statement", [RFC 7554](#), DOI 10.17487/RFC7554, May 2015,

<<http://www.rfc-editor.org/info/rfc7554>>.

[RPL-INFO] Robles, M., Richardson, M., and P. Thubert, "When to use [RFC 6553](#), [6554](#) and IPv6-in-IPv6", Work in Progress, [draft-ietf-roll-useofrplinfo-14](#), April 2017.

附錄 A. 範例

A.1. 壓縮 RPI 範例

圖 15 中的範例說明在儲存模式下所有方向上古典封包的 6LoRH 壓縮，以及在非儲存模式下對於到達根節的預設路由之後向上至 DODAG 的封包。在此特定範例中，根據 [RFC 4944](#) [[RFC4944](#)] 進行片段處理，並且在切換到第 1 頁之前，必須將段標頭放置在第 0 頁中：

```

+- ... +-+ ... -++ ... +-+ ... +--+ ... -++++-+...
|Frag type|Frag hdr |11110001| RPI- |IP-in-IP| LOWPAN_IPHC | ...
|RFC 4944 |RFC 4944 | Page 1 | 6LoRH | 6LoRH |           |
+- ... +-+ ... -++ ... +-+ ... +--+ ... -++++-+...
                                     <- RFC 6282 ->
                                     No RPL artifact

+- ... +-+ ... -++ ... -++ ... +-+ ... +--+...
|Frag type|Frag hdr |
|RFC 4944 |RFC 4944 | Payload (cont)
+- ... +-+ ... -++ ... -++ ... +-+ ... +--+...

+- ... +-+ ... -++ ... -++ ... +-+ ... +--+...
|Frag type|Frag hdr |
|RFC 4944 |RFC 4944 | Payload (cont)
+- ... +-+ ... -++ ... -++ ... +-+ ... +--+...

```

圖 15：帶有 RPI 的壓縮包範例

在儲存模式下，如果封包保留在 RPL 區域內，則可以保存 IP-in-IP 封裝，在這種情況下，只有 RPI 使用 6LoRH 進行壓縮，如圖 16 所示。非片段 ICMP 封包：

```

+- ... -++- ... -++++-+ ... -++++-+ ... -++++-+...
|11110001| RPI-6LoRH | NH = 0      | NH = 58 | ICMP message ...
|Page 1  | Type 5   | 6LOWPAN_IPHC | (ICMP)  | (no compression)
+- ... -++- ... -++++-+ ... -++++-+ ... -++++-+...
                                     <- RFC 6282 ->
                                     No RPL artifact

```

圖 16：在儲存模式下帶有 RPI 的 ICMP 封包範例

圖 16 中的格式在邏輯上等價於圖 17 中所示的未壓縮格式：

```

+--+--+ ... -++++-+ ... -++++-+...
| IPv6 Header | Hop-by-Hop | RPI in      | ICMP message ...
| NH = 58    | Header     | RPL Option  |
+--+--+ ... -++++-+ ... -++++-+...

```

圖 17：帶有 RPI 的未壓縮 ICMP 封包

對於 UDP 封包，可以使用 6LoWPAN HC [RFC6282] 壓縮傳輸標頭，如圖 18 所示：

```

+++ ... -+-+-...-+-+- ... -+-+-++ ... -+-+- ... -+-+-++...
|11110001| RPI- | NH=1 |11110CPP| Compressed | UDP
|Page 1 | 6LoRH | LOWPAN_IPHC | UDP | UDP header | Payload
+++ ... -+-+-...-+-+- ... -+-+-++ ... -+-+- ... -+-+-++...
<- RFC 6282 ->
No RPL artifact

```

圖 18：帶有 RPI 的未壓縮 ICMP 封包

如果在儲存模式下從網際網路接收封包，則根節點應該封裝封包以插入RPI。結果格式如圖19所示：

```

+++ ... -+-+-...-+-+- ... -+-+-++ ... +++ ... -+-+- ... -+-+-...
|11110001| RPI- | IP-in-IP | NH=1 |11110CPP| Compressed | UDP
|Page 1 | 6LoRH | 6LoRH | LOWPAN_IPHC | UDP | UDP header | Payld
+++ ... -+-+-...-+-+- ... -+-+-++ ... +++ ... -+-+- ... -+-+-...
<- RFC 6282 ->
No RPL artifact

```

圖 19：在儲存模式下由根插入的 RPI

A.2. 非儲存模式向下封包的範例

圖 20 中所示的範例是非儲存模式下的古典封包，用於沿著來自根節點的源路由路徑沿著 DODAG 向下的封包。假設我們有四個轉發跳到達目的地。在未壓縮的形式中，當根節點生成封包時，最後 3 個跳在路由標頭類型 3 (SRH) 中編碼，第一個跳是封包的目的地。中間跳執行交換；跳個數指示 [RFC 2460 \[RFC2460\]](#) 和 [RFC 6554\[RFC6554\]](#) 中定義的當前活躍跳。

當使用此規範進行壓縮時，在根節點生成封包時，4 個跳於 SRH-6LoRH 中編碼，最終目的地保留在 LOWPAN_IPHC 中。沒有交換；對應於第一個入口點的轉發節點在轉發時有效地消耗它，這意味著編碼封包的大小減小且跳資料的丟失。

如果 SRH-6LoRH 中的最後一個跳不是最終目的地，則它會在轉發之前刪除 SRH-6LoRH。

在圖 20 所示的特殊範例中，DODAG 中的所有位址是從相同的 /112 前綴分配，最後 2 個八位元組編碼諸如 IEEE 802.15.4 短位址的識別符。在這種情況下，可以使用根位址作為參考將所有位址

壓縮為 2 個八位元組。在此示例中，將有一個 SRH_6LoRH 標頭包含三個壓縮位址：

```

+++ ... -+++ ... +-+- ... -+-+- ... +-+--+ ... +-+--+ ... -+ ... +-...
|11110001|SRH-6LoRH| RPI- | IP-in-IP | NH=1 |11110001| UDP | UDP
|Page 1 |Type1 S=2| 6LoRH | 6LoRH |LOWPAN_IPHC| UDP | hdr |Payld
+-+ ... -+++ ... +-+- ... -+-+- ... -+--+ ... +-+--+ ... -+ ... +-...
          <-8bytes->          <- RFC 6282 ->
                               No RPL artifact

```

圖 20：帶有 SRH 的壓縮封包範例

可以注意到其提供 RPI。這是因為從 IPI 中的 RPLInstanceID 省略並推斷出作為 IP-in-IP 標頭來源的根位址。從本地上下文找到後，該位址將用作壓縮參考，以擴充 SRH-6LoRH 中的位址。

在編寫本文時可用的 RPL 規範中，根是唯一可以在 IP 封包中包含 SRH 的節點。當根轉發它沒有生成的封包時，它必須使用 IP-in-IP 封裝封包

但是，如果根生成封包朝向 DODAG 中的節點，那麼它應該避免額外的 IP-in-IP，如圖 21 所示：

```

+- ... -+--+ ... +-+--+ ... -+--+--+--+--+--+--+--+--+ ... -+--+--+--+...
|11110001| SRH-6LoRH | NH=1 | 11110001 | Compressed | UDP
|Page 1 | Type1 S=3 | LOWPAN_IPHC| LOWPAN-NHC| UDP header | Payload
+- ... -+--+ ... +-+--+ ... -+--+--+--+--+--+--+--+--+ ... -+--+--+--+...
                               <- RFC 6282 ->

```

圖 21：根源壓縮的 SRH 4 * 2 bytes 輸入

注意：雖然 RPL [RFC6550] 通常期望它，但不代表 RPI。在這種特殊情況下，由於 SRH-6LoRH 的壓縮參考是 LOWPAN_IPHC 中的源位址，並且沿來源路徑路徑的路由是嚴格的，因此 RPI 似乎不是絕對必要的。

在圖 21 中，源路由路徑上的所有節點共享相同的 /112 前綴。這是典型從 IEEE802.15.4 短位址衍生的 IPv6 地址，只要所有節點共享相同的 PAN-ID 即可。在這種情況下，類型 1 SRH-6LoRH 標頭可用於編碼。將根的 IPv6 位址作為參考，並且僅對中間跳位址的最後 2 個八位元組進行編碼。大小為 3 表示 4 個跳，導致 SRH-6LoRH 為 10 個位元組。

A.3. SRH-6LoRH 生命週期範例

本節說明第 5.6 節中指定的使用壓縮 SRH 沿 A-> B-> C-> D 源路由路徑轉發封包的操作。在每一個跳都舉例說明彈出位址的操作。

Packet as received by node A

```
-----  
Type 3 SRH-6LoRH Size = 0  AAAA AAAA AAAA AAAA  
Type 1 SRH-6LoRH Size = 0                               BBBB  
Type 2 SRH-6LoRH Size = 1                               CCCC CCCC  
                                                       DDDD DDDD
```

Step 1: Popping BBBB, the first entry of the next SRH-6LoRH

Step 2: If larger value (2 vs. 1), the SRH-6LoRH is removed

```
Type 3 SRH-6LoRH Size = 0  AAAA AAAA AAAA AAAA  
Type 2 SRH-6LoRH Size = 1                               CCCC CCCC  
                                                       DDDD DDDD
```

Step 3: Recursion ended; coalescing BBBB with the first entry

```
Type 3 SRH-6LoRH Size = 0  AAAA AAAA AAAA BBBB
```

Step 4: Routing based on next segment endpoint to B

圖 22：節點 A 上的處理

Packet as received by node B

```
-----  
Type 3 SRH-6LoRH Size = 0   AAAA AAAA AAAA BBBB  
Type 2 SRH-6LoRH Size = 1           CCCC CCCC  
                                   DDDD DDDD
```

Step 1: Popping CCCC CCCC, the first entry of the next SRH-6LoRH
Step 2: Removing the first entry and decrementing the Size (by 1)

```
Type 3 SRH-6LoRH Size = 0   AAAA AAAA AAAA BBBB  
Type 2 SRH-6LoRH Size = 0           DDDD DDDD
```

Step 3: Recursion ended; coalescing CCCC CCCC with the first entry
Type 3 SRH-6LoRH Size = 0 AAAA AAAA CCCC CCCC

Step 4: Routing based on next segment endpoint to C

圖 23：節點 B 上的處理

Packet as received by node C

```
-----  
Type 3 SRH-6LoRH Size = 0   AAAA AAAA CCCC CCCC  
Type 2 SRH-6LoRH Size = 0           DDDD DDDD
```

Step 1: Popping DDDD DDDD, the first entry of the next SRH-6LoRH
Step 2: The SRH-6LoRH is removed

```
Type 3 SRH-6LoRH Size = 0   AAAA AAAA CCCC CCCC
```

Step 3: Recursion ended; coalescing DDDD DDDDD with the first entry
Type 3 SRH-6LoRH Size = 0 AAAA AAAA DDDD DDDD

Step 4: Routing based on next segment endpoint to D

圖 24：節點 C 上的處理

Packet as received by node D

```
-----  
Type 3 SRH-6LoRH Size = 0   AAAA AAAA DDDD DDDD
```

Step 1: The SRH-6LoRH is removed
Step 2: No more header; routing based on inner IP header

圖 25：節點 D 上的處理

致謝

作者非常感謝 Tom Phinney、Thomas Watteyne、Tengfei Chang、Martin Turon、James Woodyatt、Samita Chakrabarti、Jonathan Hui、Gabriel Montenegro 和 Ralph Droms 對 6lo 工作小組的設計進行建設性的評論。整個討論涉及 6MAN、6TiSCH 和 ROLL WG 的參與者；謝謝你們。特別感謝 Michael Richardson 和 Ines Robles（ROLL WG 主席）、Brian Haberman（網際網路地區廣告公司），以及 Alvaro Retana 和 Adrian Farrel（路由區廣告公司），以推動工作小組和領域的複雜工作。

作者資訊

Pascal Thubert（編輯）
思科系統
建設 D - Regus
45 Allee des Ormes
BP1200
MOUGINS - Sophia Antipolis 06254
法國

電話：+33 4 97 23 26 34
電子郵件：pthubert@cisco.com

Carsten Bormann
Universitet Bremen TZI
Postfach 330440
Bremen D-28359
德國

電話：+ 49-421-218-63921
電子郵件：cabo@tzi.org

Laurent Toutain
IMT Atlantique
2 rue de la Chataigneraie
CS 17607
Cesson-Sevigne Cedex 35576

法國

電子郵件：Laurent.Toutain@IMT-Atlantique.fr

Robert Cragie

ARM 公司

110 Fulbourn Road

劍橋 CB1 9NJ

英國

電子郵件：robert.cragie@arm.com