

1. RFC 4944 : Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks

RFC 4944 : 通過 IEEE 802.15.4 網路傳輸 IPv6 封包

網路工作小組

Request for Comments : 4944

分類：標準

G.Montenegro

Microsoft Corporation

N. Kushalnagar

Intel Corp

J. Hui

D. Culler

Arch Rock Corp

2007 年 9 月

通過 IEEE 802.15.4 網路傳輸 IPv6 封包

本文的狀態

本文為網際網路社群指定網際網路標準協定，並請求討論和改進建議。有關本協定的標準化陳述和狀態，請參閱當前版本的“網際網路官方協定標準”（STD 1）。本文的散佈不受限制。

摘要

本文描述傳輸 IPv6 封包的訊號框格式，以及在 IEEE 802.15.4 網路上形成 IPv6 本地連結位址和無狀態自動配置位址的方法。其他規範包括使用共享上下文的簡單標頭壓縮方案和在 IEEE 802.15.4 網狀網路（mesh）中的封包傳送規定。

目錄

1. 前言	2
1.1. 要求表示法	2
1.2. 使用之術語	3
2. 用於IP的IEEE 802.15.4模式	3
3. 定址模式	4
4. 最大傳輸單位	5
5. LoWPAN適應層和訊號框格式	5
5.1. 調度類型和標頭	7
5.2. 網狀網路定址型式和標頭	9

5.3.	分段類型和標頭	10
6.	無狀態位址自動配置	12
7.	IPv6本地連結位址	13
8.	單播位址映射	13
9.	多播位址映射	15
10.	標頭壓縮	15
10.1.	IPv6標頭欄位的編碼	16
10.2.	UDP標頭欄位的編碼	18
10.3.	無壓縮位元	20
10.3.1.	無壓縮IPv6位元	20
10.3.2.	無壓縮和部分壓縮的UDP欄位	20
11.	鏈結層網狀網路中的訊號框傳遞	21
11.1.	LoWPAN廣播	22
12.	IANA考量	23
13.	安全考量	24
14.	致謝	25
15.	參考文獻	25
15.1.	規範性參考文獻	25
15.2.	訊息參考	26
附錄A.	網狀網路中框架交付的替代方案	26

1. 前言

IEEE 802.15.4 標準[ieee802.15.4]針對低功率無線個人區域網路。本文定義 IPv6 [RFC2460]封包傳輸的訊號框格式，以及在 IEEE 802.15.4 網路之上 IPv6 本地連結位址和無狀態自動配置位址的形成。由於 IPv6 需要支援比最大 IEEE 802.15.4 訊號框大小大得多的封包大小，因此定義適應層。本文也定義使用 IPv6 在 IEEE 802.15.4 網路上實用所需的標頭壓縮機制，以及 IEEE 802.15.4 網狀網路中封包傳送所需的規定。但網狀網路路由的完整規範（使用的特定協定，與鄰居發現的交換等）超出本文的範圍。

1.1. 要求表示法

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

(SHALL NOT)"，"不應該(SHOULD NOT)"，"建議(RECOMMENDED)"，"不建議(RECOMMENDED)"，"可以(MAY)"，"可選(OPTIONAL)"按照[RFC2119]中的描述進行解釋。

1.2. 使用之術語

AES：進階加密方法

CSMA/CA：載波感測多重存取／碰撞避免

FFD：全功能設備

GTS：保證時槽服務

MTU：最大傳輸單位

MAC：媒體存取控制

PAN：個人區域網路

RFD：精簡功能設備

2. 用於 IP 的 IEEE 802.15.4 模式

IEEE 802.15.4 定義四種類型的訊號框：信標訊號框，MAC 命令訊號框，確認訊號框和資料訊號框。IPv6 封包必須在資料訊號框上傳輸。資料訊號框要求進行確認是可選的。為了與[RFC3819]保持一致，建議 IPv6 封包放在需要確認的訊號框上進行傳送，以幫助鏈結層恢復。

IEEE 802.15.4 網路可以是非信標啟動或信標啟動的[ieee802.15.4]。後者是設備被稱為協調器信標同步的一個可選方式。這使得在一個非競爭的時間保證服務（GTS）內使用超級訊號框成為可能。本文並無要求 IEEE 網路運行在信標啟動模式。在非信標啟動網路中，資料訊號框（包括運載 IPv6 封包的）是通過基於競爭無槽的 CSMA/CA 通道存取方法來傳送的。

在非信標啟動網路中，同步過程不使用信標。然而，它們仍然對事件的關聯和解除關聯上的鏈結層設備是有幫助的。本文建議配置信標以實現這些功能。進一步的建議是在 IPv6 層提供這些事件以幫助檢測網路連接，這是在撰寫本文時 IETF 正在處理的問題。

該規範允許省略源位址或目標位址（或兩者）的訊號框。本文中定義的機制要求源和目標位址都包含在 IEEE 802.15.4 訊號框標頭中。同樣包含源和目標的 PAN ID 欄位。

3. 定址模式

IEEE 802.15.4 定義了幾種定址模式：它允許使用 IEEE 64 位元擴充位址或（在關聯事件之後）PAN [ieee802.15.4] 中唯一的 16 位元位址。本文支援 64 位元擴充位址和 16 位元短位址。為了在 6LoWPAN 中使用，本文對 16 位元短位址的格式施加額外的限制（超出 IEEE 802.15.4 的限制），如第 12 節所述。短位址本質上是瞬時的，需要注意的是：因為它們是由 PAN 協調器功能在一個關聯事件中分發的，它們的有效性和唯一性只限制在這一個關聯週期內。這個週期可能被關聯的有效期或 PAN 協調器發生事故而縮短。由於集中分配和 PAN 協調器的單點故障而產生的可伸縮問題，開發者在使用短位址進行這樣的網路部署時必須仔細權衡網路的增長（並實行必要的機制）。當然，IEEE 64 位元擴充位址可能沒有這些缺點，但仍然分享有關路由，發現，配置等的剩餘可擴充性問題。

本文假定 PAN 映射到特定的 IPv6 鏈接。這符合共享網路支援鏈結層子網路[RFC3819]廣播的建議。嚴格來說，IPv6 中存在多播而非廣播。但是，IEEE 802.15.4 本身不支援多播。因此，IPv6 多播封包必須作為 IEEE 802.15.4 網路中的鏈結層廣播訊號框來承載。必須這樣做，使得廣播訊號框只被一個特定鏈路 PAN 裡的設備接收。根據[ieee802.15.4]的第 7.5.6.2 節，可以通過以下方式完成：

1. 目標 PAN 識別符包含在訊號框中，它必須匹配相關鏈接的 PAN ID。
2. 訊號框中包含一個短的目標位址，它必須與廣播位址（0xffff）匹配。

此外，支援根據第 9 節映射 IPv6 多播位址必須僅用於網狀網路配置。此類功能的完整規範超出本文的範圍。

通常，主機根據[RFC4861]通過路由器廣告學習 IPv6 前綴。

4. 最大傳輸單位

在 IEEE 802.15.4 上的 IPv6 封包最大傳送單元是 1280 位元組。然而，一個 IEEE 802.15.4 訊號框裡容不下一個完整的 IPv6 封包。802.15.4 協定資料單元的大小取決於標頭的大小[ieee802.15.4]。由於一個實體層的最大訊號框長是 127 位元組(一個最大 PHY 封包長度)且一個最大訊號框長度是 25 位元組(一個最大訊號框)，所以介質存取控制層的最大訊號框長是 102 位元組。鏈路安全協定還需要增加標頭長度，最大的情況(對於 AES-CCM-128 來說是 21 位元組，AES-CCM-32 和 AES-CCM-64 分別是 9 和 13 位元組)，只剩下 81 位元組可用。這明顯遠不夠 IPv6 封包的最小長度 1280 位元組，為了和第 5 節的 IPv6 規格[RFC2460]一致，IP 層下必須提供一個片段和重組的適應層。適應層在第 5 節定義。

此外，由於 IPv6 標頭長度為 40 個位元組，因此對於上層協定(如 UDP)僅留下 41 個位元組。後者在標頭中使用 8 個位元組，僅為應用程序資料留下 33 個位元組。另外，如上所述，還需要一個片段和重組的適應層，這將消耗更多的標頭欄位組。

以上考量導致以下兩點意見：

1. 適應層必須滿足 IPv6 對於最小 MTU 的要求。然而，(a) 多數 IEEE 802.15.4 2 的應用並不會使用這麼大的封包，(b) 小量的應用資料和使用合理的標頭壓縮可以產生適合於一個 IEEE 802.15.4 訊號框的封包。使用適應層的理由不僅是為了滿足 IPv6 封包，極有可能一些應用交換(如配置或服務)產生的封包也需要少量的片段。
2. 儘管以上的空間計算顯示最壞的情況，但它的確顯示出事實上封包壓縮幾乎是不可避免的。由於我們期望大多數(如果不是全部)IP over IEEE 802.15.4 的應用程序都將使用標頭壓縮，因此在下面的第 10 節中對其進行定義。

5. LoWPAN 適應層和訊號框格式

本節中定義的封裝格式（以下稱為“LoWPAN 封裝”）是 IEEE 802.15.4 MAC 協定資料單元（PDU）中的負載。LoWPAN 負載（例如，IPv6 封包）遵循該封裝標頭。

通過 IEEE 802.15.4 傳輸的所有 LoWPAN 封裝封包都以封裝標頭堆疊為前綴。標頭堆疊中的每個標頭都包含一個標頭類型，後跟零個或多個標頭欄位。而在 IPv6 標頭中，將按以下順序堆疊包含定址，逐跳（hop-by-hop）選項，路由，分段，目的地選項以及最終負載[RFC2460]；在 LoWPAN 標頭中，類似的標頭序列是網狀網路（L2）定址，逐跳選項（包括 L2 廣播/多播），分段，最後是負載。以下的例子展示在 LoWPAN 網路中可能用到的典型的標頭堆疊。

一個 LoWPAN 封裝的 IPv6 封包：

```
+-----+-----+-----+
| IPv6 Dispatch | IPv6 Header | Payload |
+-----+-----+-----+
```

LoWPAN 封裝的 LOWPAN_HC1 壓縮 IPv6 封包：

```
+-----+-----+-----+
| HC1 Dispatch | HC1 Header | Payload |
+-----+-----+-----+
```

LoWPAN 封裝的 LOWPAN_HC1 壓縮 IPv6 封包，需要網狀網路定址：

```
+-----+-----+-----+-----+-----+
| Mesh Type | Mesh Header | HC1 Dispatch | HC1 Header | Payload |
+-----+-----+-----+-----+-----+
```

LoWPAN 封裝的 LOWPAN_HC1 壓縮 IPv6 封包需要分段：

```
+-----+-----+-----+-----+-----+
| Frag Type | Frag Header | HC1 Dispatch | HC1 Header | Payload |
+-----+-----+-----+-----+-----+
```

LoWPAN 封裝 LOWPAN_HC1 壓縮 IPv6 封包，需要網狀網路定址和分段：

```

+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| M Typ | M Hdr | F Typ | F Hdr | HC1 Dsp | HC1 Hdr | Payload |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+

```

LoWPAN 封裝的 LOWPAN_HC1 壓縮 IPv6 封包，需要網狀網路位址和廣播標頭來支援網狀網路廣播/多播：

```

+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| M Typ | M Hdr | B Dsp | B Hdr | HC1 Dsp | HC1 Hdr | Payload |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+

```

當在同一個封包中使用多個 LoWPAN 標頭時，它們必須按以下順序出現：

網狀網路定址標頭

廣播標頭

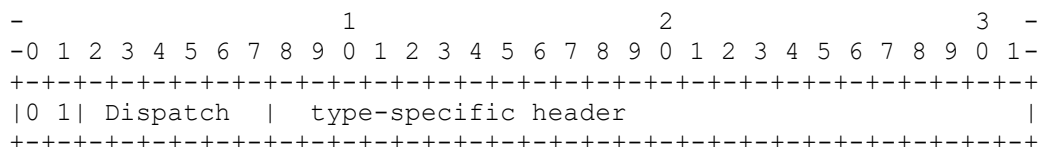
片段標頭

所有協定封包（例如，IPv6、壓縮的 IPv6 標頭，等等）應該在一個有效的 LoWPAN 封裝標頭後面，如上面所給出的例子。這可以統一軟體對封包的處理而不用管傳送方式是什麼。

LoWPAN 標頭的定義，除了網狀網路定址和片段，還包含分派值、標頭欄位的定義和與其他標頭相關的順序限制。儘管標頭堆疊提供一個處理在 LoWPAN 適應層上的未來需求的機制，但它不打算提供通用目標的可擴充性。此格式文件指定一個使用標頭堆疊的標頭類型集合，以實現清晰度，緊湊性和正交性。

5.1. 調度類型和標頭

調度類型由零位元作為第一位元 and 一位元作為第二位元定義。調度類型和標頭如下所示：



Dispatch：6 位元選擇器。識別符緊隨調度標頭之後的標頭類型。
type-specific header：由調度標頭確定的標頭。

圖 1：調度類型和標頭

可以將調度值視為非結構化命名空間。只需要幾個符號來表示當前的 LoWPAN 功能。雖然通過在調度位元組中編碼附加功能可以實現一些額外的節省，但這些措施往往會限制解決未來替代方案的能力。

Pattern	Header Type
00 xxxxxx	NALP - Not a LoWPAN frame
01 000001	IPv6 - Uncompressed IPv6 Addresses
01 000010	LOWPAN_HC1 - LOWPAN_HC1 compressed IPv6
01 000011	reserved - Reserved for future use
...	reserved - Reserved for future use
01 001111	reserved - Reserved for future use
01 010000	LOWPAN_BC0 - LOWPAN_BC0 broadcast
01 010001	reserved - Reserved for future use
...	reserved - Reserved for future use
01 111110	reserved - Reserved for future use
01 111111	ESC - Additional Dispatch byte follows
10 xxxxxx	MESH - Mesh Header
11 000xxx	FRAG1 - Fragmentation Header (first)
11 001000	reserved - Reserved for future use
...	reserved - Reserved for future use
11 011111	reserved - Reserved for future use
11 100xxx	FRAGN - Fragmentation Header (subsequent)
11 101000	reserved - Reserved for future use
...	reserved - Reserved for future use
11 111111	reserved - Reserved for future use

圖 2：調度值位元型樣

NALP：指明接下來的位元序列不是 LoWPAN 封裝的一部分，任何 LoWPAN 節點收到一個分派值為 00xxxxxx 的封包應該要忽略。其他非 LoWPAN 協定想要和 LoWPAN 節點共存的應該要在 802.15.4 標頭後包含一個與這個序列相同的位元組。

IPv6：指定以下標頭是未壓縮的 IPv6 標頭[RFC2460]。

LOWPAN_HC1:指定以下標頭是LOWPAN_HC1壓縮IPv6標頭。
該標頭格式在圖9中定義。

LOWPAN_BC0:指定以下標頭是用於網狀網路廣播/多播支援的
LOWPAN_BC0標頭，並在第11.1節中進行描述。

ESC:指明接下來的標頭是一個用於分派值的單獨的8位元。它
允許支援分派值大於127。

5.2. 網狀網路定址型式和標頭

網狀網路型式由一位元和零位元定義為前兩位元。網狀網路型式
和標頭如下所示：

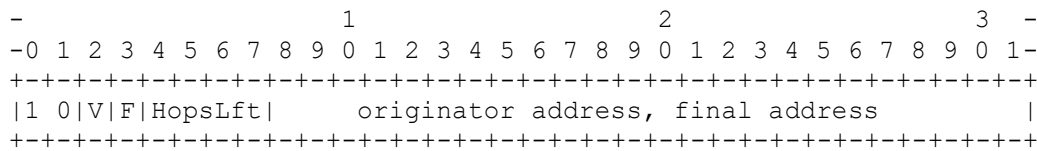


圖3：網狀網路定址型式和標頭

欄位定義如下：

V:如果發起者（或“Very first”）位址是IEEE擴充64位元位
址(EUI-64)，則該1位位元應為零；如果是16位元短位址，
則該1位元應為1。

F:如果最終目標位址是IEEE擴充的64位元位址（EUI-64），
則該1位位元應為零；如果是16位元短位址，則該1位元應
為1。

Hops Left:這個4位元的值應該由每一個轉發節點在發送封包到
下一跳前減1。如果Hops Left值減到0封包將不再轉發。值
0xF保留並表示緊跟其後的8位元Deep Hops Left欄位，並
允許源節點指定一個大於14的跳數限制。

發起者位址(originator address):這是發起者的鏈結層位址。

最終目的地位址(final address):這是最終目的地的鏈結層位址。

請注意，'V'和'F'位元允許混合使用 16 和 64 位元位址。這至少對於允許網狀網路層“廣播”是有用的，因為 802.15.4 廣播位址被定義為 16 位元短位址。

關於網狀網路中訊號框傳遞的進一步討論見第 11 節。

5.3. 分段類型和標頭

如果一個完整的負載(如 IPv6)資料封包裝在一個單獨的 802.15.4 訊號框裡，它就是非片段的，那麼 LoWPAN 封裝就不必包含一個片段標頭。如果資料封包不是封裝在一個單獨的 IEEE802.15.4 訊號框內，它應該被分解成鏈接片段。因為資料封包偏移量只能表示為 8 位元組的倍數，所以除了最後一片段外的所有片段大小都必須為 8 位元組的整數倍。第一個鏈結片段應該包含第一個片段標頭，其定義如下圖所示：

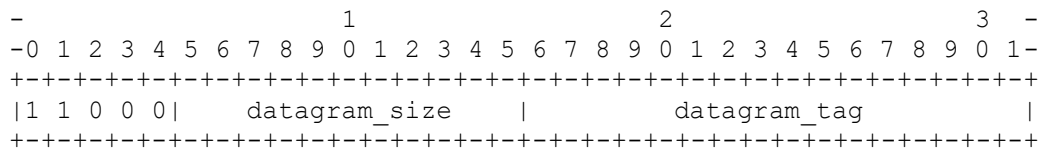


圖 4：第一片段

第二個和以後的鏈結片段（直到包含最後一個）應該包含的片段標頭如下圖所示：

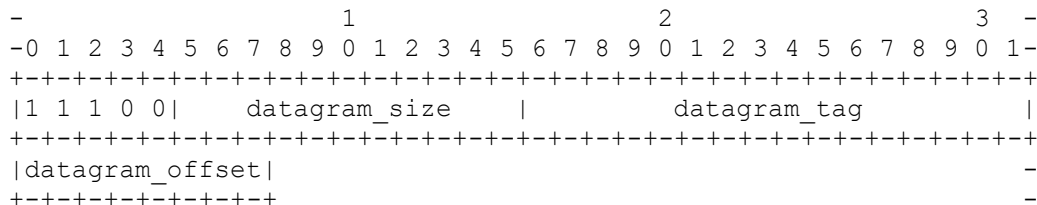


圖 5：後續片段

資料封包長度(datagram_size)：此 11 位元欄位在鏈結層分段之前（但在 IP 層分段之後）對整個 IP 封包的大小進行編碼。對於 IP 封包的所有鏈結層片段資料封包長度的值應該相同。對於 IPv6，這應該是 40 位元組（未壓縮的 IPv6 標頭的大小）大於封包的 IPv6 標頭[RFC2460]中的負載長度值。注意，該封包可能已經被通訊中涉及的主機分段，即該位元需要編碼

最大長度為 1280 個位元組（IEEE 802.15.4 鏈結 MTU，如本文中所定義的）。

注意：此位元不需要在每個封包中，因為可以使用第一個片段發送它並隨後將其刪除。但是，如果第二個（或後續）鏈結片段在第一個（或後續）之前到達，則將其包含在每個鏈結片段中可以簡化重組任務。在這種情況下，一旦任何片段到達就保證學習資料封包長度，告訴接收器在等待其餘片段時要留出多少緩衝空間。上面的格式簡化效率。

資料封包標籤(datagram_tag)：資料封包標籤的值對於負載（例如，IPv6）封包的所有鏈結片段應該是相同的。發送方應為連續的，分段的封包增加資料封包標籤。資料封包標籤的遞增值應該從 65535 回退到零。該位元長度為 16 位元，未定義其初始值。

資料封包偏移(datagram_offset)：該位元僅存在於第二個和後續鏈結片段中，並且應從有效資料封包開頭指定片段的增量（以 8 個位元組為增量）。封包的第一個位元組（例如，IPv6 標頭的開頭）具有零偏移；第一個鏈結片段中資料封包偏移的隱含值為零。該位元長度為 8 位元。

鏈結片段的接收者應使用（1）發送者的 802.15.4 源位址（如果存在網狀網路位址位元，則為發起者位址），（2）目的地的 802.15.4 位址（或者如果網狀網路位址為當前，則為最終目的地位址），（3）資料封包長度，以及（4）資料封包標籤，用於標識屬於給定封包的所有鏈結片段。

收到鏈結片段後，接收者開始構建大小為資料封包長度的原始未分段封包。它使用資料封包偏移位元來確定原始未分段封包中各個片段的位置。例如，它可以將資料負載（封裝頭除外）放在由資料封包偏移指定的位置中的負載封包重組緩衝區內。重組緩衝區的大小應由資料封包長度確定。

如果接收到與另一個片段重疊的鏈結片段，如上所述，並且在重疊片段的大小或資料封包偏移中不同，則已經累積在重組緩衝器中的片段將被丟棄。可以用最近接收的鏈結片段開始新的重組。

片段重疊由來自封裝標頭的資料封包偏移和來自 802.15.4 實體層協定資料單元 (PPDU) 封包標頭的“訊號框長度”的組合確定。

在檢測到 IEEE 802.15.4 解除關聯事件時，片段接收者必須丟棄所有部分重組的有效資料封包所有鏈結片段，並且片段發送者必須丟棄所有部分發送的負載（例如，IPv6）封包的所有尚未發送的鏈結片段。相似地，當節點首先接收具有給定資料封包標籤的片段時，它啟動重組計時器。當此時間到期時，如果尚未重新組裝整個封包，則必須丟棄現有的片段，並且必須刷新重組狀態。重組超時必須設置為最多 60 秒（這也是 IPv6 重組過程[RFC2460]中的超時）。

6. 無狀態位址自動配置

本節字義如何獲得一個 IPv6 介面識別符。

IEEE 802.15.4 介面的介面識別符[RFC4291]可以基於分配給 IEEE 802.15.4 設備的 EUI-64 識別符[EUI64]。在這種情況下，介面識別符由 EUI-64 根據“IPv6 over Ethernet”規範[RFC2464]形成。

所有 802.15.4 設備都具有 IEEE EUI-64 位址，但 16 位元短位址（第 3 節和第 12 節）也是可能的。在這些情況下，如下形成“偽 48 位元位址”。首先，通過將 16 個零位元連接到 16 位元 PAN ID 來形成最左邊的 32 位（或者，如果不知道 PAN ID，則可以使用 16 個零位元）。這將產生一個 32 位元欄位，如下所示：

16_bit_PAN : 16_zero_bits

然後，這些 32 位元與 16 位元短位址連接。這將產生一個 48 位元的位址，如下所示：

32_bits_as_specified_previously : 16_bit_short_address

根據“IPv6 於乙太網路路”規範[RFC2464]，介面識別符由該 48 位元位址構成。但是，在得到的介面識別符中，“Universal/Local”（U/L）位元應設置為零，以保持這不是全局唯一值的事實。對於任一位址格式，不得使用所有零位址。

可以使用手動或通過軟體設置的不同 MAC 位址來導出介面識別符。如果使用這樣的 MAC 位址，則其全局唯一性屬性應反映在 U/L 位的值中。

用於 IEEE 802.15.4 介面的無狀態自動配置[RFC4862]的 IPv6 位址前綴必須具有 64 位元的長度。

7. IPv6 本地連結位址

通過將如上定義的介面識別符附加到前綴 FE80::

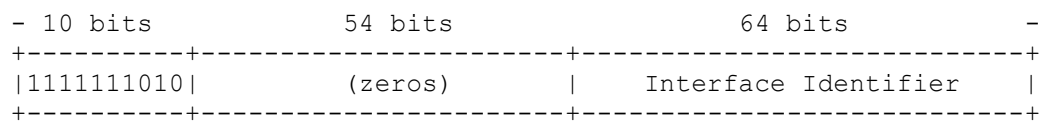


圖 6

8. 單播位址映射

除非另有說明，否則將 IPv6 非多播位址映射到 IEEE 802.15.4 鏈結層位址的位址解析過程遵循[RFC4861]第 7.2 節中的一般描述。當鏈結層為 IEEE 802.15.4 且位址分別為 EUI-64 或 16 位元短位址時，源/目標鏈結層位址選項具有以下形式。

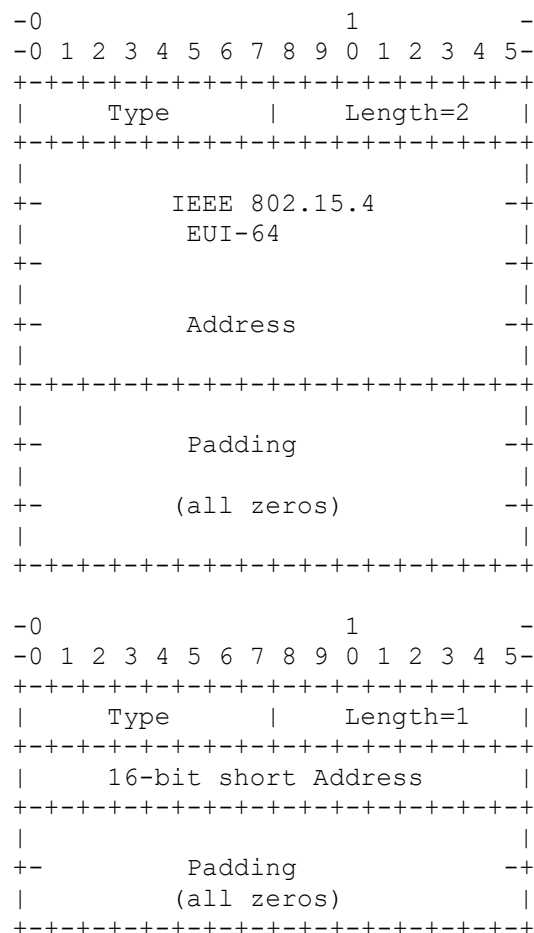


圖 7

選項欄位：

類型(Type)：

- 1: 用於源鏈結層位址。
- 2: 用於目標鏈結層位址。

長度(Length)：這是此選項的長度（包括類型和長度欄位），以 8 個八位元組為單位。如果使用 EUI-64 位址，則此位元的值為 2；如果使用 16 位元短位址，則該值為 1。

IEEE 802.15.4 位址：64 位元 IEEE 802.15.4 位址，或 16 位元短位址（按照第 9 節中的格式），按規範位元順序。這是介面當前響應的位址。由於隱私或安全性（例如，鄰居發現）考量，該位址可以與用於導出介面識別符的內置位址不同。

9. 多播位址映射

本節中的功能必須僅在啟用網狀網路的 LoWPAN 中使用。具有多播目的位址 (DST) 的 IPv6 封包由 16 個八位元組 DST [1]到 DST [16]組成，被發送到以下 802.15.4 16 位元多播位址：

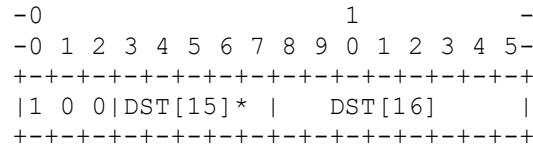


圖 8

這裡，DST [15] *指的 DST [15]中的最後 5 位，即 DST [15]中的位 3-7。最初的 3 位元型樣“100”遵循多播位址的 16 位元位址格式（第 12 節）。

這允許 6LoWPAN 網路內的多播支援，但是這種支援的完整規範超出本文的範圍。機制的範例是：泛流，受控泛流，單播到 PAN 協調器等。預期這將由不同的網狀網路路由機制指定。

10. 標頭壓縮

關於標頭壓縮有很多已散佈和正在進行的標準化工作。然而，基於 IEEE 802.15.4 的 IPv6 標頭壓縮具有不同的約束，總結如下：

現有工作假設任何兩個設備之間存在許多流。在這裡，我們假設一個非常簡單和低情境的標頭壓縮。然而這運行獨立於流（可能是多個流）工作，但它不使用任何特定於任何流的上下文。因此，它的壓縮效果沒有單獨為每個流進行內容壓縮的方法好。

考慮到封包大小的限制，對第 2 層與第 3 層進行壓縮是非常有必要的，這在傳統上是沒有作的（雖然現在的改變是因為 ROHC (RObust 標頭壓縮) 工作組）。

預計 IEEE 802.15.4 設備將部署在多跳網路中。然而，網狀網路中的標頭壓縮偏離通常的點對點鏈結場景，其中壓縮器和解壓縮器彼此直接且唯一地通訊。在 IEEE 802.15.4 網路中，

非常希望設備能夠通過其任何鄰居發送標頭壓縮封包，同時盡可能減小預先上下文處理。

標頭壓縮所需的任何新封包格式都可以使用不同的調度值重用第 5 節中定義的基本封包格式。

標頭壓縮可能導致不能對齊 8 位元組邊界的情況。由於硬體通常不能傳送小於一個位元組的資料單元，因此必須使用填充。填充如下：首先，佈置整個連續壓縮標頭序列（本文僅定義 IPv6 和 UDP 標頭壓縮方案，但其他可在其他地方定義）。然後，應該適當地添加零位元以對準八位元組邊界。這抵消由標頭壓縮引起的任何潛在的失準，因此後續位元（例如，無壓縮標頭或資料負載）在八位元組邊界上開始並延續下去。

10.1. IPv6 標頭欄位的編碼

由於加入相同的 6LoWPAN 網路，設備共享一些狀態。這使得可以壓縮標頭而不用明確創建任何壓縮上下文狀態。因此，6LoWPAN 標頭壓縮並不保留任何流狀態；反而，它依賴於與整個鏈路相關的資訊。以下的 IPv6 標頭值是對於 6LoWPAN 網路是通用的，因此 HC1 標頭的構造是為了從一開始就有效地壓縮它們：版本是 IPv6；IPv6 源位址和目的位址都是本地鏈結；可以從第二層源位址和目標位址推斷源位址或目標位址的 IPv6 介面識別符（底部 64 位元）（當然，這僅適用於從底層 802.15.4 MAC 位址產生的介面識別符）；封包長度可以從第二層（IEEE 802.15.4 PDU 中的“訊號框長度”）或片段頭中的“資料封包長度”位元（如果存在）推斷出來；流量類別和流程標號均為零；下一個標頭是 UDP，ICMP 或 TCP。IPv6 標頭中唯一需要始終完整攜帶的字段是跳數限制（8 位元）。取決於封包與這種常見情況的匹配程度，不同的位元可能無法壓縮，因此也需要“在線”傳輸（第 10.3.1 節）。可以將這個通用 IPv6 標頭（如上所述）壓縮為 2 個位元組（HC1 編碼為 1 個位元組，跳限制為 1 個位元組），而不是 40 個位元組。通過使用 LOWPAN_HC1 的調度值，接著是 LOWPAN_HC1 標頭“HC1 編碼”位元（8 位元），這樣的封包可通過 LOWPAN_HC1 格式壓縮，以編碼如下所示的不同組合。該標頭之前可以有片段標頭，mesh 標頭可以在片段標頭之前。

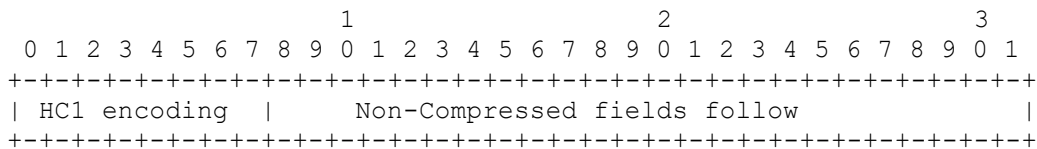


圖 9：LOWPAN_HC1（通用壓縮標頭編碼）

如下面（位元 7）所示，一個 HC2 編碼後面可能是一個 HC1 位元組。在這種情況下，HC2 編碼欄位後面是一個無壓縮位元（第 10.3 節）。

由“HC1 編碼”編碼的位址位元解釋如下：

PI：內嵌的前綴（第 10.3.1 節）。

PC：前綴壓縮（假設鏈接本地前綴）。

II：內嵌的介面識別字（第 10.3.1 節）。

IC：省略的介面識別符（可從相應的鏈結層位址導出）。如果在網狀網路中進行路由應用時源位址或目標位址的介面識別符（第 11 節），相應的鏈結層位址是在“網狀網路定址”位元中找到的（第 5.2 節）。

“HC1 編碼”如下所示（從第 0 位元開始到第 7 位元結束）：

IPv6 源位址（位元 0 和 1）：

00: PI, II

01: PI, IC

10: PC, II

11: PC, IC

IPv6 目標地址（位元 2 和 3）：

00: PI, II

01: PI, IC

10: PC, II

11: PC, IC

流量類別和流程標籤（第 4 位元）：

0：未壓縮；全 8 位元的流量類別和 20 位元的流程編號都會發送

1：流量類別和流程編號為零

下一個標頭（第 5 和第 6 位元）：

00：未壓縮；發送完整的 8 位元

01：UDP

10：ICMP

11：TCP

HC2 編碼（第 7 位元）：

0：沒有更多的標頭壓縮位元

1：HC1 編碼後面有更多 HC2 編碼格式的標頭壓縮位元。
位 5 和 6 確定 HC2 編碼的用途（例如，UDP，ICMP 或 TCP 編碼）。

10.2. UDP 標頭欄位的編碼

LOWPAN_HC1 的第 5 位元和第 6 位元允許壓縮 IPv6 標頭中下一個標頭的位元（對於 UDP，TCP 和 ICMP）。還可以進一步壓縮這些協定標頭中的每一個。本節介紹如何壓縮 UDP 標頭本身。本節中的 HC2 編碼是 HC_UDP 編碼，並且僅當 HC1 中的位元 5 和 6 指示 IPv6 標頭之後的協定是 UDP 時才適用。HC_UDP 編碼

(圖 10) 允許壓縮 UDP 標頭中的以下位元：源埠號，目標埠號和長度。UDP 標頭的校驗和欄位不可壓縮，因此已完整攜帶。下面定義的方案允許將 UDP 標頭壓縮為 4 個位元組，而不是原來的 8 個位元組

可以從其他地方的可用訊息推導出其值的唯一 UDP 標頭欄位是“長度”。另一個欄位必須全部或部分壓縮方式在線傳輸（第 10.3.2 節）。

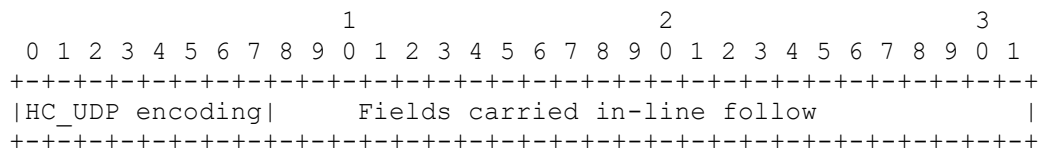


圖 10：HC_UDP（UDP 通用壓縮標頭編碼）

UDP 的“HC_UDP 編碼”如下所示（從第 0 位元開始到第 7 位元結束）：

UDP 來源埠號（第 0 位元）：

0: 未壓縮，“在線”進行（第 10.3.2 節）

1: 壓縮為 4 位元。通過計算： $P + \text{short_port}$ 值獲得實際的 16 位元源埠號。P 的值是 61616 (0xF0B0)。short_port 表示為一個 4 位元值，它是“在線”傳送的（第 10.3.2 節）

UDP 目標埠號（第 1 位元）：

0: 未壓縮，“在線”進行（第 10.3.2 節）

1: 壓縮為 4 位元。通過計算： $P + \text{short_port}$ 值獲得實際的 16 位元目標埠號。P 的值是 61616 (0xF0B0)。short_port 表示為一個 4 位元值，它是“在線”傳送的（第 10.3.2 節）

長度（第 2 位元）：

0: 未壓縮，“在線”進行（第 10.3.2 節）

1: 壓縮，長度根據 IPv6 標頭長度訊息計算。UDP 長度位元的值等於 IPv6 標頭中的負載長度減去 IPv6 標頭和 UDP 標頭之間存在的任何擴充標頭的長度。

保留（第 3 到 7 位元）

10.3. 無壓縮位元

10.3.1. 無壓縮 IPv6 位元

該方案允許 IPv6 標頭被壓縮到不同的程度。因此，不需要發送整個（標準）IPv6 標頭，而只需要發送無壓縮欄位。後續標頭（由原始 IPv6 標頭中的下一個標頭欄位指定）緊跟在 IPv6 無壓縮欄位之後。

未壓縮的 IPv6 定址由分派類型描述，該分派類型包含 IPv6 分派值，後跟未壓縮的 IPv6 標頭。此分派類型可以在其他 LoWPAN 標頭之後。

必須始終存在的無壓縮 IPv6 位元是跳數限制（8 位元）。該位元必須始終遵循編碼欄位（例如，如圖 9 所示的“HC1 編碼”），可能包括其他未來的編碼欄位。其他無壓縮位元必須遵循“HC1 編碼”所暗示的跳躍限制，其順序與上面顯示的完全相同（第 10.1 節）：源位址前綴（64 位元）和/或介面識別符（64 位元），目標位址前綴（64 位元）和/或介面識別符（64 位元），流量類別（8 位元），流程編號（20 位元）和下一個標頭（8 位元）。實際的下一個標頭（例如，UDP，TCP，ICMP 等）遵循無壓縮欄位。

10.3.2. 無壓縮和部分壓縮的 UDP 欄位

該方案允許 UDP 標頭被壓縮到不同的程度。因此，代替整個（標準）UDP 標頭，僅需要發送無壓縮或部分壓縮的欄位。

UDP 標頭中的無壓縮或部分壓縮欄位必須始終遵循 IPv6 標頭及其任何相關的成行欄位。存在的任何 UDP 標頭內聯欄位必須以與相應欄位出現在普通 UDP 標頭[RFC0768]中相同的順序出現，例如，源埠號，目的埠號，長度和核對和。如果源埠號或目標埠號採用“short_port”表示法（如壓縮 UDP 頭中所示），則內埠號取 4 位元，而不是取 16 位元。

11. 鏈結層網狀網路中的訊號框傳遞

即使預計 802.15.4 網路通常會使用網狀網路路由，IEEE 802.15.4-2003 規範[ieee802.15.4]沒有定義這種功能。在這種情況下，全功能設備（FFD）運行臨時或網狀網路路由協定以填充其路由表（在本文範圍之外）。在這種網狀情況下，在這樣網狀網路場景下，兩個設備不需要直接連接才能進行通訊。對於這些設備，發送者表示為“發起端”，接收都表示為“目標端”。一個發起端設備可能通過其他中繼裝置來轉發資料到目標端。為了使用單播完成這樣的訊號框傳送，除了逐跳來源和目的地之外，還必須包括始發者和最終目的地的鏈結層位址。

本節定義在給定目標“最終目的地”鏈結層位址的情況下如何在網狀網路中實現第 2 層訊號框的傳送。

通過在 LoWPAN 封裝的其他任何標頭（第 5 節）之前包括網狀定址標頭，未分段和分段的標頭，可以啟用網狀網路傳遞；一個完整的 IPv6 標頭；或根據第 10 節或任何其他地方定義的壓縮 IPv6 標頭。

如果節點希望使用默認網狀網路轉發器來傳遞封包（即，因為它沒有到目的地的直接可達性），它必須包括一個網狀網路定址標頭，其中發起者的鏈結層位址設置為它自己的，並且最終目的地的鏈結層位址設置為封包的最終目的地。它將 802.15.4 標頭中的源位址設置為自己的鏈結層位址，並將轉發器的鏈結層位址放在 802.15.4 標頭的目標位址欄位中。最後，它傳輸封包。

類似地，如果節點接收到具有網狀網路定址標頭的訊號框，則它必須查看網狀網路定址標頭的“最終目的地”欄位以確定真實目的地。如果節點本身是最終目的地，則按正常傳遞消耗封包。

如果它不是最終目的地，則設備然後減少“Hops Left”欄位，如果結果為零，則丟棄該封包。否則，節點查詢其鏈結層路由表，確定到最終目的地的下一跳應該是什麼，並將該位址放在 802.15.4 標頭的目的位址欄位中。最後，節點將 802.15.4 標頭中的源位址更改為自己的鏈結層位址並發送封包。

鑒於節點必須在一個 mesh 路由式通訊協定裡充當轉發者，不是所有節點都要求進行 mesh 轉發。只有“全功能設備”(FFDs)才需要在 mesh 網路中充當路由器。“簡化功能設備”(RFDs)只限於發現 FFDs 然後使用它們進行轉發，形式上類似於 IP 主機通常使用預設路由來轉發所有的無連接資料封包。對於使用 mesh 傳送的 RFD，“轉發器”始終是適當的 FFD。

11.1. LoWPAN 廣播

另外網狀網路路由的功能是使用緊隨路由標頭之後的路由標頭進行編碼的。特別是，廣播標頭由 LOWPAN_BC0 分派以及後面的序列號欄位組成。後跟序列號欄位。序列號用於檢測重複的封包（並希望能夠抑制它們）。

```

                                1
      0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5
+---+---+---+---+---+---+---+---+---+
|0|1|LOWPAN_BC0 |Sequence Number|
+---+---+---+---+---+---+---+---+

```

圖 11：廣播標頭

欄位定義如下：

序列號(Sequence Number)：每當發送新的網狀網路廣播或多播封包時，該 8 位元的欄位應由發起者遞增。有關如何處理此欄位的完整說明超出本文的範圍。

這個網狀網路層廣播的進一步描述，如映射到流控制機制，拓撲發現等都不在本文的討論範圍內。

其他網狀網路路由功能，例如指定網狀網路路由協定，源路由等，可以通過定義在標頭堆疊中的分段或定址標頭之前的附加路由

標頭來表示。此類網狀網路路由功能的完整規範超出本文的範圍。

12. IANA 考量

本文創建兩個新的 IANA 註冊管理機構，如下所述。這些註冊管理機構的未來任務將通過 IANA 根據“規範要求”[RFC2434]的規範進行協調。預計此規範將允許其他（非 IETF）組織更輕鬆地獲得作業。

本文為第 5 節定義的標頭中分派類型欄位創建一個新的 IANA 註冊。本文定義 IPv6 值，LOWPAN_HC1 標頭壓縮，BC0 廣播和兩個逃脫模式（NALP 指示不是一個 LOWPAN 訊號框，ESC 允許額外的分派位元組）。本文定義這個欄位為 8 位長。值 00xxxxxx 是保留的，總共有 192 個不同的值可用，這應該足夠用。如果定義對於 HC1 標頭壓縮格式，或額外的 TCP，ICMP HC2 格式，那麼這時候就應該在 LOWPAN_HC1 之後使用保留的分派值。如果定義額外的網狀網路傳送格式，這就會使用 LOWPAN_BC0 後的保留值。

This document creates a new IANA registry for the 16-bit short address fields as used in 6LoWPAN packets.

本文為 6LoWPAN 封包中使用的 16 位元短位址欄位創建新的 IANA 註冊表。

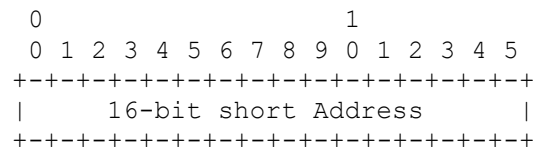


圖 12

這個註冊必須包含位址 0xffff（目前當監聽通道時所有設備都接受的 16 位元廣播位址）和在[ieee802.15.4]中定義的 0xfffe。另外，在 6LoWPAN 網路中，16 位元短位址必須使用這種格式（從 0 到 7 的位序列），這裡“x”是一位未指定的值：

範圍 1,0xxxxxxxxxxxxxxxxx：如果 16 位元短位址是單播位址，則第一位元（位元 0）應為零。這為實際位址留下 15 位元。

範圍 2,100xxxxxxxxxxxxxx：如果 16 位元短位址是多播位址，則位元 0,1 和 2 應遵循此模式（參見第 9 節）。這為實際的多播位址留下 13 位元。

範圍 3,101xxxxxxxxxxxxxx：保留位元 0,1 和 2 的此模式。任何未來的任務都應遵循上述規則。

範圍 4,110xxxxxxxxxxxxxx：保留位元 0,1 和 2 的此模式。任何未來的任務都應遵循上述規範。

範圍 5,111xxxxxxxxxxxxxx：保留位元 0,1 和 2 的此模式。任何未來的任務都應遵循上述規範。

13. 安全考量

從 EUI-64 MAC 位址推導出介面識別符的方法旨在盡可能保持全局唯一性。然而，沒有方法來預防故障或偽裝產生的重複。

802.15.4 網路中網狀網路路由是很常用的。這意味著由於使用 [KW03] 的臨時路由而產生的其他威脅。IEEE 802.15.4 為鏈結層安全性提供一些功能。如果可能和實際的話，敦促用戶使用這些規定。這樣做可以減輕上述威脅。

預期相當大比例的 IEEE 802.15.4 設備總是在其 PAN 內進行通訊（即，在其鏈結內，以 IPv6 的方式來說）。考慮到成本和功耗問題，並保持 IEEE 802.15.4 模型的“簡化功能設備”（RFDs），這些設備通常只有最小部分必需的功能。因此，這些設備的安全性很大程度上依賴於 IEEE 802.15.4 鏈結層的安全機制。然而，後者僅定義用於 IEEE 802.15.4 訊號框的認證或加密的高級加密標準（AES）模式，並且沒有特別指定密鑰管理（可能是導向群組的）。實際部署中要解決的其他問題涉及安全配置和管理。儘管這樣的完整描述超出本文的範圍，但是必須在部署 IEEE 802.15.4 網路時考慮到這些考慮因素。當然，還期望一些 IEEE 802.15.4 設備（所謂的“全功能設備”或“FFD”）將實現協調或集成功能。它們可以定期與離線 IPv6 對等方通訊（除了更常見的鏈接交換之外）。期望此類 IPv6 設備通過常規機制（例如 IPsec，TLS 等）來保護其端到端通訊。

14. 致謝

感謝 RFC 2464 和 RFC 2734 的作者，本文的部分內容是引用他們的模式。感謝 Geoff Mulligan 進行有用的討論，這些討論有助於形成這份文件。Erik Nordmark 的建議有助於標頭壓縮部分。還要感謝 Shoichi Sakane，Samita Chakrabarti，Vipul Gupta，Carsten Bormann，Ki-Hyung Kim，Mario Mao，Phil Levis，Magnus Westerlund 和 Jari Arkko。

15. 參考文獻

15.1. 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.
- [RFC2434] Narten, T. and H. Alvestrand, "Guidelines for Writing an IANA Considerations Section in RFCs", [BCP 26](#), [RFC 2434](#), October 1998.
- [RFC2460] Deering, S. and R. Hinden, "Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification", [RFC 2460](#), December 1998.
- [RFC2464] Crawford, M., "Transmission of IPv6 Packets over Ethernet Networks", [RFC 2464](#), December 1998.
- [RFC4291] Hinden, R. and S. Deering, "IP Version 6 Addressing Architecture", [RFC 4291](#), February 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.

[ieee802.15.4] IEEE Computer Society, "IEEE Std. 802.15.4-2003", October 2003.

15.2. 訊息參考

- [EUI64] "GUIDELINES FOR 64-BIT GLOBAL IDENTIFIER(EUI-64) REGISTRATION AUTHORITY", IEEE.
<http://standards.ieee.org/regauth/oui/tutorials/EUI64.html>.
- [KW03] Karlof, Chris and Wagner, David, "Secure Routing in Sensor Networks: Attacks and Countermeasures", Elsevier's AdHoc Networks Journal, Special Issue on Sensor Network Applications and Protocols vol 1, issues 2-3, September 2003.
- [RFC0768] Postel, J., "User Datagram Protocol", STD 6, [RFC768](#), August 1980.
- [RFC3756] Nikander, P., Kempf, J., and E. Nordmark, "IPv6 Neighbor Discovery (ND) Trust Models and Threats", [RFC 3756](#), May 2004.
- [RFC3819] Karn, P., Bormann, C., Fairhurst, G., Grossman, D., Ludwig, R., Mahdavi, J., Montenegro, G., Touch, J., and L. Wood, "Advice for Internet Subnetwork Designers", [BCP 89](#), [RFC 3819](#), July 2004.

附錄 A. 網狀網路中框架交付的替代方案

在最後選擇一個網狀網路（節 11）的傳送機制之前，先考慮一下其他的可選方法。除了逐跳源和目標鏈結層位址，在 LoWPAN 網狀網路上傳送一個封包還需要端對端的發起端和目標端的位址。這同樣適合於第 2 層和第 3 層（也就是 IP）。在後者情況，本文不需要提供額外的標頭支援（也就是，它本身包含在 LoWPAN 標頭內）。鏈結層的目標位址會指向下一跳目標位址而 IP 標頭的目標位址會指向最終目標（IP）位址（可能距離源主機

有很多跳)，源位址也是類似的。因此，當轉發資料時，單跳源和目標位址會在每一跳後改變（分別指向要轉發的節點，和“最好”的鏈結層下一跳），而源和目標 IP 位址依然沒有改變。注意，如果一個 IP 封包被片段，單個的片段可能不按順序到達任一個節點。如果第一個片段（包含 IP 標頭）由於某種原因延遲，接收到其他片段的節點會缺少必要的資訊。它會強制等待直到接收到 IP 標頭（在第一個片段內）才能把封包進行轉發。這要求中間節點增加額外的緩存空間。此外，這一個規格只對一種類型的 LoWPAN 負載有用：IPv6。通常，它必須增加適配器以適用於其他負載，並要求負載提供自己的端對端位址資訊。

另一方面，最終採用的方法（第 11 節）在 LoWPAN 層（第 3 層以下）創建一個網狀網路。因此，鏈結層始發者和最終目的地位址包括在 LoWPAN 標頭內。這為在 LoWPAN 適應層上分層的任何協定或應用程序啟用網狀網路傳送（第 5 節）。對於本文中支援的 IPv6，將發起方和最終目的地表示為第 2 層位址的另一個優點是可以根據第 10 節中指定的標頭壓縮來壓縮 IPv6 位址。此外，維護路由表所需要的空間由於 802.15.4 位址（64 位元或 16 位元）的大小而減小，相對於 IPv6 地址（128 位元）。缺點是在 IP 頂層的應用不使用鏈結層目標位址來封裝封包。因此，給定 IP 位址，需要解析相應的鏈結層位址。於是，網狀路由規範需要闡明鄰居發現的含義，儘管在某些特殊情況下，位址在第 3 層（反之亦然）。這種完整的規範超出本文的範圍。

作者資訊

Gabriel Montenegro

微軟公司

電子郵件：gabriel.montenegro@microsoft.com

Nandakishore Kushalnagar

英特爾公司

電子郵件：nandakishore.kushalnagar@intel.com

Jonathan W. Hui

Arch Rock Corp.

電子郵件：jhui@archrock.com

David E. Culler

Arch Rock Corp.

電子郵件：dculler@archrock.com

完整的版權聲明

版權所有 (C) IETF Trust (2007 年)。

本文受 BCP 78 中包含的權利，許可和限制的約束，除了其中規定，作者保留其所有權利。

本文及其中包含的資訊按“原樣”提供，並且由（如果有），網際網路協會，IETF 信託和網際網路工程任務部門提供的贊助商，組織他/她代表或贊助所有保證，明示或暗示，包括但不限於任何保證使用此處的訊息不會侵犯任何權利或任何暗示的適銷性或適用於特定用途的保證。

智慧財產權

IETF 對於可能聲稱與實施或使用本文中描述的技術有關的任何知識財產權或其他權利的有效性或範圍，或根據此類權利獲得的任何許可可能或不可能的程度，均不採取任何立場；它也不代表它已經做出任何獨立的努力來確定任何此類權利。有關 RFC 文件中權利的程序的訊息可以在 BCP 78 和 BCP 79 中找到。

可以獲取向 IETF 秘書處披露的 IPR 的副本以及可以提供的任何許可保證，或者為了獲得本規範的實施者或用戶獲得使用此類所有權的一般許可或許可的結果，可以獲得來自 IETF 在線知識產權知識庫，網址為 <http://www.ietf.org/ipr>。

IETF 邀請任何感興趣的團體提請其注意，可能涵蓋實施該標準所需技術的任何版權，專利或專利申請或其他所有權。請通過 ietf-ipr@ietf.org 將訊息發送給 IETF。