

11. RFC 7668 : IPv6 over BLUETOOTH(R) Low Energy
RFC 7668 : 低功耗藍芽上的 IPv6

網際網路工程任務組(IETF)
Request for Comments : 7668
分類：標準
ISSN : 2070-1721

J. Nieminen
TeliaSonera
T.Savolainen
M.Isomaki
Nokia
B.Patil
AT&T
Z.Shelby
ARM
C. Gomez
Universitat Politecnica de Catalunya/i2CAT
2015年10月

低功耗藍芽上的 IPv6

摘要

藍芽智慧型是藍芽技術聯盟定義的藍芽規範中藍芽低功耗特性的品牌名稱。標準藍芽無線電已廣泛實施，可用於移動電話，筆記本電腦，音頻耳機和許多其他設備。藍芽的低功耗版本是一種規範，可以將此無線介面與傳感器，智能電錶，電器等設備結合使用。藍芽的低功耗版本自藍芽規範的4.0版本開始已經標準化，儘管 IPv6 需要 4.1 或更高版本。本文描述了如何使用 IPv6 通過低功耗無線個人區域網（6LoWPAN）技術使用低功耗藍芽傳輸 IPv6 訊息。

本文的狀態

這是網際網路標準跟踪文檔。本文是網際網路工程任務組(IETF)的產品。它代表了 IETF 團隊的共識。它已經過公眾審查，並已獲得網際網路工程指導小組（IESG）的批准發布。有關網際網路標準的更多訊息，請參見 RFC 5741 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的訊息，請訪問 <http://www.rfc-editor.org/info/rfc7668>。

版權聲明

版權所有 (c) 2015 IETF Trust 和被確認為文件作者的人員。版權所有。本文受 BCP 78 和 IETF 信託有關 IETF 文件的法律規定 (<http://trustee.ietf.org/license-info>) 的約束，該文件自本文件發布之日起生效。請仔細閱讀這些文檔，因為它們描述了您對本文的權利和限制。從本文中提取的代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	3
1.1. 術語和語言要求	3
2. 低功耗藍芽	4
2.1. 低功耗藍芽堆疊	5
2.2. 鏈路層的角色與拓撲	6
2.3. 低功耗藍芽設備尋址	6
2.4. 低功耗藍芽封包大小和最大傳輸單元	7
3. 低功耗藍芽IPv6規範	7
3.1. 協定疊	8
3.2. 鏈結模型	8
3.2.1. IPv6子網模型和網路連接	9
3.2.2. 無狀態地址自動配置	10
3.2.3. 鄰居發現	12
3.2.4. 標頭壓縮	13
3.2.4.1. 遠程目標實例	14
3.2.4.2. 多個地址的註冊實例	15
3.2.5. 單播和多播地址映射	16
4. 安全考慮因素	16
5. 參考	17
5.1. 規範性引用	17
5.2. 訊息參考	18
致謝	19
貢獻者	20

1. 前言

藍芽智慧型是藍芽技術聯盟[BTCrev4.1]定義的藍芽規範中藍芽低功耗特性（以下稱為“低功耗藍芽”）的品牌名稱。低功耗藍芽是一種無線電技術，適用於使用極低容量（例如鈕扣電池）電池或簡約電源工作的設備，這意味著低功耗是必不可少的。低功耗藍芽是一種特別有吸引力的物聯網應用技術，如健康監視器，環境感應，接近應用等等。

考慮到傳感器和互聯網連接設備數量呈指數增長的可能性，IPv6 用於與這些設備進行通信是一種理想的協定，因為它提供了較大的地址空間。此外，IPv6 還提供了無狀態地址自動配置工具，尤其適用於處理能力非常有限或缺乏完整操作系統或用戶界面的傳感器網路應用和節點。

本文描述了如何使用 IPv6 通過低功耗無線個人區域網（6LoWPAN）技術使用低功耗藍芽連接傳輸 IPv6 訊息。RFC 4944 [RFC4944]，6282 [RFC6282]和 6775 [RFC6775]是為 6LoWPAN 開發的，並指定通過 IEEE 802.15.4 [IEEE802.15.4]傳輸 IPv6。低功耗藍芽鏈路在許多方面具有與 IEEE 802.15.4 類似的特性，並且通過 IEEE 802.15.4 為 IPv6 定義的許多機制可以應用於低功耗藍芽鏈路上的 IPv6 傳輸。本文詳細說明了通過低功耗藍芽鏈路進行 IPv6 傳輸的詳細訊息。

1.1. 術語和語言要求

本文件中的關鍵詞"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 RFC 2119 [RFC2119]中的描述進行解釋。術語"6LoWPAN Node (6LN)"，"6LoWPAN Router (6LR)"和"6LoWPAN Border Router (6LBR)"按照在[RFC6775]中

定義，另外還有 Bluetooth LE 中心和 Bluetooth LE 外設（參見第 2.2 節）可以是 6LN 或 6LBR。

在本文中使用的縮寫“DAC”，“DAM”，“SAC”，“SAM”和“CID”如[RFC6282]中所定義。它們的全稱如下：

- 目標地址壓縮（DAC）
- 目標地址模式（DAM）
- 源地址壓縮（SAC）
- 源地址模式（SAM）
- 上下文標識符（CID）

2. 低功耗藍芽

低功耗藍芽設計用於以適度的數據速率不頻繁地傳輸少量數據，每位元的能量消耗非常小。藍芽技術聯盟（Bluetooth SIG）推出了兩個商標：藍芽智慧型用於單模設備（一種僅支援低功耗藍芽的設備）和藍芽智慧型就緒用於雙模設備（支援藍芽和低功耗藍芽的設備；注意藍芽和低功耗藍芽是不同的，非互操作的無線電技術）。在本文的其餘部分中，無論單模或雙模設備是否支援此技術，都使用術語“低功耗藍芽”。

低功耗藍芽在藍芽 4.0 中引入，在藍芽 4.1 [BTCorev4.1]中得到了增強，並在後續版本中得到進一步發展。藍芽技術聯盟還發布了網際網路協定支援配置文件（IPSP）[IPSP]，其中包括網際網路協定支援服務（IPSS）。IPSP 允許發現啟用 IP 的設備並建立用於傳輸 IPv6 封包的鏈路層連接。低功耗藍芽上的 IPv6 依賴於藍芽 4.1 和 IPSP 1.0 或更新版本的其一規範來提供必要的功能。

諸如移動電話，筆記本電腦，平板電腦，智能手錶和其他包含實現藍芽 4.1 或更高版本的晶片組的手持計算設備的設備也將具有藍芽的低能量功能。預計低功耗藍芽還將包含在與手機，平板電腦和筆記本電腦等移動設備協作的許多不同類型的配件中。用於低功耗藍芽附件的用例的實例是心率監視器，其通過移動電話或智能手錶將數據發送到因特網上的服務器或直接將數據發送到設備。

2.1. 低功耗藍芽堆疊

低功耗藍芽堆疊的下層包括物理層（PHY），鏈路層（LL）和稱為直接測試模式（DTM）的測試介面。物理層發送和接收實際分組。鏈路層負責提供介質訪問，連接建立，錯誤控制和流量控制。直接測試模式僅用於測試目的。上層包括邏輯鏈路控制和適配協定（L2CAP），屬性協定（ATT），安全管理器（SM），通用屬性配置文件（GATT）和通用訪問配置文件（GAP），如圖 1 所示。控制器介面（HCI）將通常在藍芽控制器中實現的較低層與較高層（通常在主機堆疊中實現）分離。GATT 和低功耗藍芽配置文件共同支援以標準化方式創建應用程式，而無需使用 IP。L2CAP 通過多路復用來自上述層的數據通道來提供多路復用能力。L2CAP 還為大型封包提供分段和重組。安全管理器為低功耗藍芽設備定義配對，密鑰分發和安全工具箱的協定和機制。

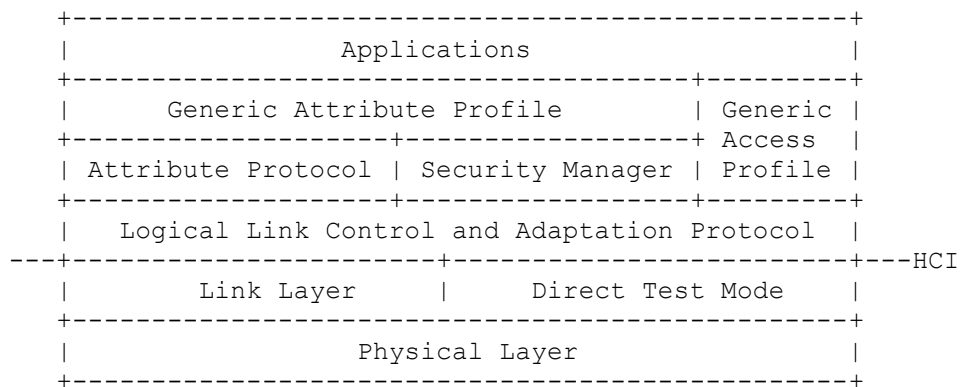


圖 1：藍芽 LE 協定疊

如第 3.1 節所示，基於 Bluetooth LE 的 IPv6 需要一個經過適配的 6LoWPAN 層，該層運行在 Bluetooth LE L2CAP 之上。

2.2. 鏈路層的角色與拓撲

低功耗藍芽定義了兩個與此相關的 GAP 角色：低功耗藍芽中心角色和低功耗藍芽外圍角色。處於核心角色的設備（從現在開始稱為“中央”）傳統上能夠與外圍角色中的多個設備（從現在開始稱為“外圍設備”）管理多個同時連接。外圍設備通常連接到單個中央設備，但從 4.1 開始配備的藍芽版本，它也可以同時連接到多個中心設備。在本文中，對於 IPv6 網路目的，低功耗藍芽網路（即低功耗藍芽極微網）遵循圖 2 中所示的星形拓撲，其中路由器通常實現低功耗藍芽中心角色，其餘節點實現低功耗藍芽外圍角色。將來，可以通過低功耗藍芽為 IPv6 定義一次到多個中心的網狀網路和/或併行連接。

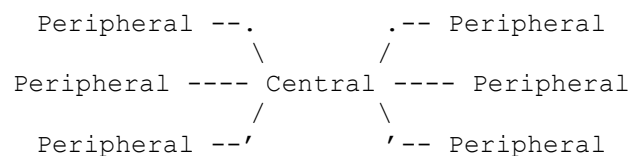


圖 2：藍芽 LE 星狀拓撲

在低功耗藍芽中，直接無線通信僅在中央和外圍之間進行。這意味著低功耗藍芽星本身就代表了一個中心輻射鏈路模型。然而，根據該規範，兩個外圍設備可以通過使用 IP 路由功能在中央進行通信。

2.3. 低功耗藍芽設備尋址

每個低功耗藍芽設備都由一個 48 位設備地址標識。藍芽規範 [BTCorev4.1] 描述了低功耗藍芽設備的設備地址，如下所示：“使用設備地址識別設備。設備地址可以是公共設備地址或隨機設備地址”。公共設備地址基於 IEEE 802 標準 [IEEE802]。隨機設備地址和低功耗藍芽隱私特性分別在 [BTCorev4.1] 的藍芽通用接入配置文件，第 10.8 節和第 10.7 節中有描述。有兩種類型的隨機設備地址：靜態和私有地址。私有地址進一步分為兩個子類型：可解析或不可解析的地址，在參考的藍芽規範中對其進行了深入的解釋。一旦靜態地址被初始化，它就不會改變，直到設備重新上電。靜態地址可以在每個電源循環後初始化為新值，但這不是強制性

的。隨機化新專用地址之前的推薦時間間隔是 15 分鐘，由藍芽通用接入配置文件[BTCorev4.1]的表 17.1 中的定時器 T_GAP (private_addr_int) 確定。選擇使用哪種設備地址類型是特定於實現和部署的。在隨機地址中，前 46 位是隨機的，後 2 位表示隨機地址類型。低功耗藍芽不支援避免或檢測設備地址衝突。但是，這些 48 位隨機設備地址在典型部署中發生衝突的可能性非常小。

2.4. 低功耗藍芽封包大小和最大傳輸單元

通過低功耗藍芽為 L2CAP 固定通道定義的最佳 MTU 是 27 個八位元組，包括 4 個八位元組的 L2CAP 標頭。因此，低功耗藍芽的默認 MTU 定義為 27 個八位元組。因此，排除 4 個八位元組的 L2CAP 標頭，23 個八位元組的協定數據單元 (PDU) 大小可用於上層。為了能夠傳輸 1280 個八位元組或更大的 IPv6 分組，L2CAP 層提供了鏈路層分段和重組解決方案。IPSP 定義了用於協商鏈路層連接的裝置，該連接為 IPv6 層[IPSP]提供 1280 個八位元組或更高的 MTU。鏈路層 MTU 針對每個方向單獨協商。需要兩個方向的相同鏈路層 MTU 的實現應使用盡可能最小的不同的 MTU 值。

3. 低功耗藍芽 IPv6 規範

低功耗藍芽技術對低功耗設定了嚴格的要求，因此限制了允許的協定開銷。6LoWPAN 標準[RFC6775][RFC6282]提供了可以減少功耗的功能，適用於低功耗藍芽。此功能由鏈路本地 IPv6 地址和無狀態 IPv6 地址自動配置（參見第 3.2.2 節），鄰居發現（參見第 3.2.3 節）和標頭壓縮（參見第 3.2.4 節）組成。由於低功耗藍芽的鏈路層分段支援，未使用 6LoWPAN 標準的分段功能（參見第 2.4 節）。IEEE 802.15.4 和低功耗藍芽之間的顯著差異在於前者支援星形和網狀拓撲（並且需要路由協定），而低功耗藍芽當前不支援在鏈路層形成多跳網路。但是，通過使用每個規範的 IP 路由功能，可以實現通過中央的外部通信。在低功耗藍芽中，假設中心節點比外圍節點具有更少的資源約束。因此，在主要部署方案中，中央和外圍設備將分別充當 6LoWPAN 邊界路由器（6LBR）和 6LoWPAN 節點（6LN）。在通過低功耗藍芽進行任

何 IP 層通信之前，低功耗藍芽啟用的節點（例如 6LN 和 6LBR）必須找到彼此並建立合適的鏈路層連接。藍芽 SIG 在 IPSP 規範 [IPSP] 中記錄了發現和低功耗藍芽連接建立過程。在低功耗藍芽隨機設備地址衝突的罕見情況下，6LBR 可以檢測具有相同低功耗藍芽設備地址的多個 6LN，以及具有與 6LBR 相同的低功耗藍芽地址的 6LN。6LBR 必須忽略具有 6LBR 所具有的相同設備地址的 6LN，並且 6LBR 在任何給定時刻必須具有至多一個用於給定低功耗藍芽設備地址的連接。這將避免解決低功耗藍芽網路內的衝突。

3.1. 協定疊

圖 3 說明了 IPv6 堆疊如何與低功耗藍芽 L2CAP 層之上的 GATT 堆疊並行工作。這裡需要 GATT 疊用於發現支援網際網路協定支援服務的節點。提供 UDP 和 TCP 作為傳輸協定的實例，但是堆疊可以由能夠在 IPv6 上運行的任何其他上層協定使用。

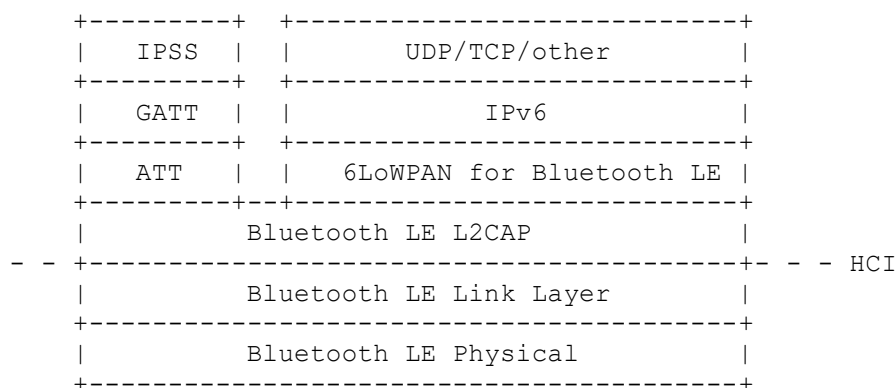


圖 3：藍芽 LE 堆疊上的 IPv6 和 IPSS

3.2. 鏈結模型

需要明確 IPv6 鏈路（第 3 層）和物理鏈路（PHY 和媒體訪問控制（MAC）的組合）的不同概念，並且必須很好地理解它們之間的關係，以便指定用於傳輸 IPv6 的尋址方案 低功耗藍芽鏈路上的封包。RFC 4861 [RFC4861] 將鏈路定義為“節點可以在鏈路層進行通信的通信設施或介質，即緊鄰 IP 的那層”。

在低功耗藍芽的情況下，6LoWPAN 層適於支援通過低功耗藍芽傳輸 IPv6 分組。IPSP 定義了設置 6LoWPAN 可以在其上運行的低功耗藍芽連接所需的所有步驟[IPSP]，包括處理低功耗藍芽上所需的鏈路層分段，如第 2.4 節所述。即使可以支援大於 1280 個八位元組的 MTU，也建議使用 1280 個八位元組的 MTU，以避免路徑 MTU 發現所需的過程。

雖然低功耗藍芽協定（如 L2CAP）使用小端位元組排序，但 IPv6 封包必須以大端順序（網路位元組順序）傳輸。

根據此規範，必須使用 RFC 6282 [RFC6282]中指定的 IPv6 標頭壓縮格式。可以從 L2CAP 標頭長度導出 IPv6 有效載荷長度，並且可以從低功耗藍芽連接建立時使用的鏈路層地址，連接期間的 HCI 連接句柄，壓縮上下文（如果有的話）重建可能省略的 IPv6 地址。和地址註冊訊息（參見第 3.2.3 節）。

用於構建星型拓撲的低功耗藍芽連接本質上是點對點的，因為藍芽廣播功能不用於低功耗藍芽上的 IPv6（發現支援 IPSS 的節點除外）。在外圍設備和中央設備連接到低功耗藍芽級別後，可以認為鏈路已啟動，並且可以開始 IPv6 地址配置和傳輸。

3.2.1. IPv6 子網模型和網路連接

在低功耗藍芽極微網模型（參見第 2.2 節）中，每個外圍設備都有一個到中央的獨立鏈路，而中心則充當 IPv6 路由器而不是鏈路層交換機。如[RFC4903]中所討論的，IPv6 的傳統使用預期 IPv6 子網跨越鏈路層的單個鏈路。由於低功耗藍芽上的 IPv6 旨在用於受約束的節點，並且對於物聯網用例和環境，在每個外圍中心鏈路上實現單獨子網以及在子網之間路由的複雜性似乎過多。在低功耗藍芽的情況下，將中央鏈路和其連接的外圍設備之間的點對點鏈路集合視為單個多鏈路子網而不是多個單獨的子網的好處被認為超過了多鏈路模型的缺點，如[RFC4903]。

因此，已經選擇了多鏈路模型，如圖 4 中進一步所示。因此，鏈路本地多播通信僅在單個低功耗藍芽連接內發生；因此，使用鏈路本地地址的 6LN 到 6LN 通信是不可能的。連接到同一 6LBR

的 6LN 必須使用子網上使用的共享前綴相互通信。6LBR 確保不會發生地址衝突（參見第 3.2.3 節），並將一個 6LN 發送的封包轉發給另一個。

在典型情況下，低功耗藍芽網路連接到網際網路，如圖 4 所示。在此方案中，低功耗藍芽星被部署為一個子網，使用一個 /64 IPv6 前綴，每個輻條代表一個單獨的鏈路。6LBR 充當路由器並在 6LN 之間以及來自網際網路之間轉發封包。

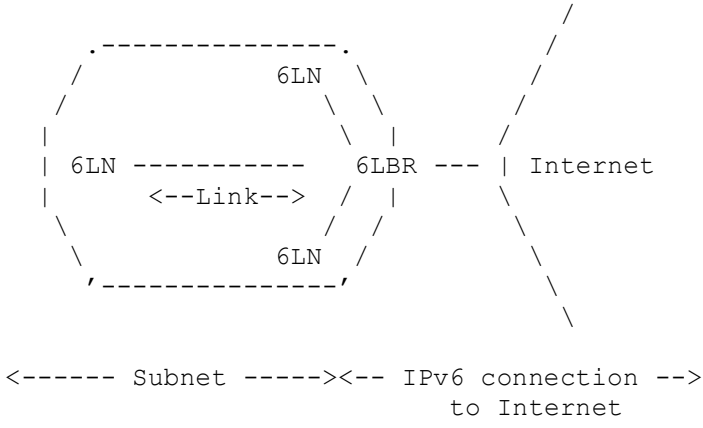


圖 4：藍芽 LE 網路已連接到網際網路

在某些情況下，低功耗藍芽網路可能暫時或永久成為隔離網路，如圖 5 所示。在這種情況下，整個星形由一個具有多個鏈路的子網組成，其中 6LBR 位於中心，在 6LN 之間路由封包。在最簡單的情況下，隔離網路有一個 6LBR 和一個 6LN。

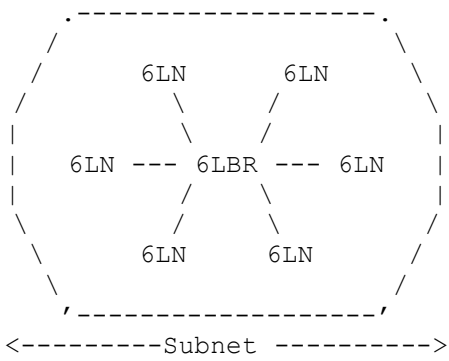


圖 5：隔離的藍芽 LE 網路

3.2.2. 無狀態地址自動配置

在網路介面初始化時，6LN 和 6LBR 都應根據用於建立基礎低功耗藍芽的 48 位藍芽設備地址（參見第 2.3 節）生成並分配給低功耗藍芽網路介面 IPv6 鏈路本地地址[RFC4862]。連接。建議使用 6LN 和 6LBR 來使用專用藍芽設備地址。6LN 應該為每個帶有 6LBR 的低功耗藍芽連接選擇不同的藍芽設備地址，而 6LBR 應定期更改其隨機藍芽設備地址。在[RFC7136]的指導下，通過插入兩個八位元組，在 48 位藍芽設備地址的中間，使用十六進制值 0xFF 和 0xFE，從 48 位藍芽設備地址形成 64 位介面標識符（IID）。如圖 6 所示。在圖中，字母“b”表示藍芽設備地址中的一個位，按原樣複製，不對任何位進行任何更改。這意味著 IID 中的任何位都不表示底層藍芽設備地址是公共的還是隨機的。

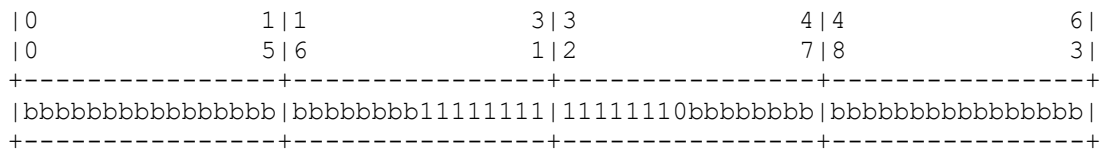


圖 6：從藍芽設備地址形成 IID

然後在前綴為 fe80 :: / 64 的前面加上 IID，如 RFC 4291 [RFC4291] 中所述，如圖 7 所示。相同的鏈路本地地址應該用於低功耗藍芽 L2CAP 通道的生命週期。（在建立低功耗藍芽邏輯鏈路之後，在 HCI 中使用連接句柄引用它。因此，可能更改設備地址不會影響現有 L2CAP 通道內的數據流。因此，無需更改 IPv6 鏈路本地地址 即使設備在 L2CAP 通道生命週期內改變其隨機設備地址）。

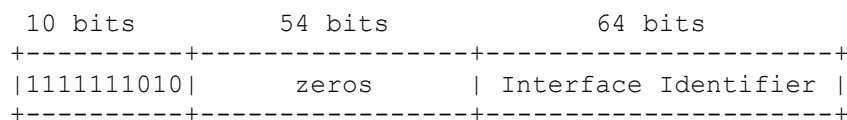


圖 7：藍芽 LE 中的 IPv6 鏈接本地地址

6LN 必須加入全節點多播地址。6LN 不需要加入請求節點多播地址，因為 6LBR 將知道所有連接的 6LN 的設備地址和鏈路本地地址。6LBR 將確保不會同時連接具有相同低功耗藍芽設備地址的兩個設備。重複鏈路本地地址的檢測由 6LBR 上的過程執行，該過程負責發現啟用 IP 的低功耗藍芽節點並啟動低功耗藍芽連接

建立過程。這種方法增加了 6LBR 的複雜性，但通過減少強制封包傳輸的數量，在鏈路建立階段降低了 6LN 和 6LBR 的功耗。

在鏈路本地地址配置之後，6LN 發送路由器請求訊息，如 [RFC4861] 第 6.3.7 節中所述。

對於非鏈路本地地址，6LN 不應配置為默認情況下將藍芽設備地址嵌入 IID 中。默認情況下應該使用替代方案，如密碼生成地址 (CGA) [RFC3972]，隱私擴充 [RFC4941]，基於哈希的地址 (HBA) [RFC5535]，DHCPv6 [RFC3315] 或靜態，語義不透明地址 [RFC7217]。在已知藍芽設備地址是私有設備地址和/或在 IID 中嵌入設備地址的頭壓縮優點需要支援部署約束的情況下，6LN 可以通過利用 48-形成 64 位 IID。位藍芽設備地址。6LN 生成的非鏈路本地地址必須按照第 3.2.3 節中的描述在 6LBR 中註冊。

用於 6LBR 獲取用於編號低功耗藍芽網路的 IPv6 前綴的工具超出了本文的範圍，但可以通過 DHCPv6 前綴授權 [RFC3633] 或使用唯一本地 IPv6 單播地址 (ULA) 來實現。[RFC4193]。由於低功耗藍芽的鏈路模型（參見第 3.2.1 節），6LBR 必須在鄰居發現訊息 [RFC4861] 的前綴訊息選項中將“on-link”標誌 (L) 設置為零（參見第 3.2.3 節）。這將導致 6LN 總是將封包發送到 6LBR，包括目的地是使用相同前綴的另一個 6LN 的情況。

3.2.3. 鄰居發現

“基於低功率無線個人區域網 (6LoWPAN) 的 IPv6 的鄰居發現優化” [RFC6775] 描述了適用於若干 6LoWPAN 拓撲的鄰居發現方法，包括網狀拓撲。低功耗藍芽不支援網狀網路；因此，僅考慮適用於星形拓撲的那些方面。

鄰居發現優化的以下方面 [RFC6775] 適用於低功耗藍芽 6LN：

1. 低功耗藍芽 6LN 絕不能註冊其鏈路本地地址。低功耗藍芽 6LN 必須通過發送帶有地址註冊選項 (ARO) 的鄰居請求 (NS) 訊息來註冊其非鏈路本地地址和 6LBR，並相應地處理鄰居通告 (NA)。無論用於生成 IID 的方法如何，都必須發送帶有 ARO 選項的 NS。如果 6LN 在同一壓縮上下文中註冊多個不

基於藍芽設備地址的地址，則標頭壓縮效率將降低（參見第 3.2.4 節）。

2. 對於發送路由器請求和處理路由器通告，低功耗藍芽 6LN 必須分別遵循[RFC6775]的第 5.3 和 5.4 節。

3.2.4. 標頭壓縮

RFC 6282 [RFC6282]中定義的標頭壓縮，在 IEEE 802.15.4 之上指定 IPv6 封包的壓縮格式，需要作為低功耗藍芽之上的 IPv6 標頭壓縮的基礎。所有頭文件必須根據 RFC 6282 [RFC6282]中描述的編碼格式進行壓縮。

可以利用低功耗藍芽的星形拓撲結構和 ARO 來提供地址壓縮機制。以下文本描述了低功耗藍芽之上的 IPv6 地址壓縮原理。

ARO 選項需要使用 64 位擴充唯一標識符（EUI-64）[RFC6775]。在低功耗藍芽的情況下，該字段應填充由轉換為 64 位修改的 EUI-64 格式[RFC4291]的低功耗藍芽節點使用的 48 位設備地址。

為了實現有效的標頭壓縮，當 6LBR 發送路由器通告時，它必須包括 6LoWPAN 上下文選項（6CO）[RFC6775]，匹配通過前綴訊息選項（PIO）[RFC4861]通告的每個地址前綴，用於無狀態地址自動配置。

當 6LN 正在向 6LBR 發送封包時，如果它是鏈路本地地址，它必須完全忽略源地址。對於帶有非鏈路本地源地址的 6LBR 的其他封包，6LN 已向 ARO 註冊到指示前綴的 6LBR，如果源地址是 6LN 已註冊的最新地址，則必須完全省略源地址對於指示的前綴。如果源非鏈路本地地址不是最新註冊的，則 IID 的 64 位應全部以行方式攜帶（SAM = 01），或者如果 IID 的前 48 位與最新註冊的地址匹配，則 IID 的最後 16 位應在線傳送（SAM = 10）。也就是說，如果 SAC = 0 且 SAM = 11，則 6LN 必須使用從低功耗藍芽設備地址派生的鏈路本地 IPv6 地址，如果 SAC = 1 且 SAM = 11，則 6LN 必須已註冊源 IPv6 地址使用與壓縮上下文相關的前綴，6LN 必須引用與壓縮上下文相關的最近註冊地址。只有在 6LBR 向其狀態字段設置為成功的 ARO 發送了 Neighbor

Advertisement 之後，才能認為 IPv6 地址是註冊的。如果目標地址是基於 6LBR 藍芽設備地址（DAC = 0，DAM = 11）的 6LBR 鏈路本地地址，則必須完全省略目標 IPv6 地址。

如果已為目標地址設置了上下文，則必須完全或部分省略目標 IPv6 地址，例如，當目標前綴為鏈路本地時，DAC = 0 且 DAM = 01，如果壓縮上下文，則 DAC = 1，DAM = 01 已配置為使用的目標前綴。

當 6LBR 正在向 6LN 發送封包時，如果源 IPv6 地址是基於 6LBR 的藍芽設備地址（SAC = 0，SAM = 11）的鏈路本地地址，它必須完全忽略源 IID，並且它必須忽略如果已設置與 IPv6 源地址相關的壓縮上下文，則為源前綴或地址。如果 6LBR 是基於 6LN 的藍芽設備地址（DAC = 0，DAM = 11）的鏈路本地地址，或者如果目的地地址是 6LN 最新註冊的 ARO，則 6LBR 也必須完全忽略目標 IPv6 地址指示的上下文（DAC = 1，DAM = 11）。如果目標地址是非鏈接本地地址而不是最新註冊的，則 6LN 必須完全包含 IID 部分（DAM = 01），或者如果 IID 的前 48 位與最新匹配註冊地址，然後忽略那些 48 位（DAM = 10）。

3.2.4.1. 遠程目標實例

當 6LN 使用全局單播 IPv6 地址將 IPv6 封包發送到遠程目標時，如果為 6LN 的全局 IPv6 地址定義了上下文，則 6LN 必須根據第 3.1 節在壓縮 IPv6 標頭的相應源字段中指示此上下文。RFC 6282 [RFC6282] 並且必須刪除先前在 ARO 註冊的完整 IPv6 源地址（如果使用最新註冊的地址；否則，部分或全部 IID 可能必須在線傳輸）。為此，6LN 必須在 IPv6 壓縮標頭中使用以下設置：SAC = 1 且 SAM = 11。CID 可以設置為 0 或 1，具體取決於使用的上下文。在這種情況下，6LBR 可以推斷出省略的 IPv6 源地址，因為 1) 6LBR 先前已經為 6LN 分配了前綴；2) 6LBR 維護一個鄰居緩存，該緩存與設備地址和設備向 ARO 註冊的 IID 相關。如果為 IPv6 目標地址定義了上下文，則 6LN 還必須在壓縮 IPv6 標頭的相應目標字段中指示此上下文，並且忽略前綴或完整目標 IPv6 地址。為此，6LN 必須將壓縮 IPv6 標頭的 DAM 字段設置為 DAM = 01（如果上下文覆蓋 64 位前綴）或 DAM = 11（如果上下文覆

蓋完整的 128 位地址)。DAC 必須設置為 1。請注意，當為 IPv6 目標地址定義上下文時，6LBR 可以使用上下文推斷省略的目標前綴。

當 6LBR 收到低功耗藍芽網路外部的遠程節點發送的 IPv6 封包，並且封包的目的地是 6LN 時，如果為 6LN 的全局 IPv6 地址的前綴定義了上下文，則 6LBR 必須指示此上下文在壓縮的 IPv6 標頭的相應目標字段中。如果 IPv6 目標地址可由 6LN 驅動，則 6LBR 必須在轉發之前忽略封包的 IPv6 目標地址。為此，6LBR 將 IPv6 壓縮標頭的 DAM 字段設置為 DAM = 11 (如果地址是最新的 6LN 已註冊)。DAC 需要設置為 1。如果為 IPv6 源地址定義了上下文，則 6LBR 需要在壓縮 IPv6 標頭的源字段中指示此上下文，並且也要刪除該前綴。為此，6LBR 需要將 IPv6 壓縮標頭的 SAM 字段設置為 SAM = 01 (如果上下文覆蓋 64 位前綴) 或 SAM = 11 (如果上下文覆蓋完整的 128 位地址)。SAC 應設置為 1。

3.2.4.2. 多個地址的註冊實例

如上所述，6LN 可以註冊映射到相同壓縮上下文的多個非鏈路本地地址。從註冊的多個地址，只能完全省略最新地址 (SAM = 11, DAM = 11)，並且先前註冊的地址的 IID 必須完全在線傳輸 (SAM = 01, DAM = 01)，或者，在最好的情況下，可以部分省略 (SAM = 10, DAM = 10)。這在以下實例中說明：

1. 6LN 註冊第一個地址 2001:db8::1111:2222:3333:4444 到 6LBR。此時，可以使用 SAC = 1 / SAM = 11 或 DAC = 1 / DAM = 11 完全省略地址。
2. 6LN 將第二個地址 2001:db8::1111:2222:3333:5555 註冊到 6LBR。由於第二個地址現在是最新註冊的，因此可以使用 SAC = 1 / SAM = 11 或 DAC = 1 / DAM = 11 完全省略。現在可以使用 SAC = 1 / SAM = 10 或 DAC = 1 / DAM = 10 來部分省略第一地址，因為地址的前 112 位在第一和第二寄存地址之間是相同的。
3. 第一個或第二個地址的註冊時間到期對壓縮沒有影響。因此，即使最近註冊的地址到期，也只能部分省略第一地址 (SAC = 1 / SAM = 10, DAC = 1 / DAM = 10)。6LN 可以註冊新地址，或重新註冊過期地址，以便能夠再次完全忽略地址。

3.2.5. 單播和多播地址映射

低功耗藍芽鏈路層不支援多播。因此，兩個低功耗藍芽節點之間的流量始終是單播的。即使在 6LBR 連接到多個 6LN 的情況下，6LBR 也不能對所有連接的 6LN 進行多播。如果 6LBR 需要向其所有 6LN 發送多播封包，則必須複製封包並在每個鏈路上單播。然而，這可能不是節能的，並且如果中央是電池供電則必須特別小心。為了進一步節省功耗，6LBR 必須以低功耗藍芽鏈路級粒度（不是子網粒度）跟踪多播偵聽器，並且它絕不能將多播封包轉發到尚未註冊為封包所屬多播組的偵聽器的 6LN。在相反的方向上，6LN 總是必須向 6LBR 發送封包或通過 6LBR 發送封包。因此，當 6LN 需要發送 IPv6 多播分組時，6LN 將相應的低功耗藍芽分組單播到 6LBR。

4. 安全考慮因素

通過低功耗藍芽鏈路傳輸 IPv6 和通過 IEEE 802.15.4 傳輸 IPv6 具有類似的要求和安全性問題。IPSP [IPSP] 涵蓋低功耗藍芽鏈路層的安全注意事項。

低功耗藍芽鏈路層通過使用具有 CBC-MAC (CCM) 機制的計數器[RFC3610]和 128 位 AES 分組密碼來支援加密和認證。上層安全機制可以在可用時利用此功能。（注意：CCM 不會消耗每個封包最大 L2CAP 數據大小的八位元組，因為鏈路層數據單元在使用時會有一個特定的字段。）

低功耗藍芽中的密鑰管理由安全管理協定 (SMP) 提供，如 [BTCorev4.1] 中所定義。

直接測試模式提供兩種設置選擇：有無可訪問的 HCI。在具有可訪問 HCI 的設計中，所謂的上位測試器通過 HCI（可由通用異步接收器發送器 (UART)，通用串行總線 (USB) 和安全數字傳輸支援）進行通信，具有物理層和鏈路層。正在測試的低功耗藍芽設備。在沒有可訪問 HCI 的設計中，上層測試儀通過雙線

UART 介面與被測設備通信。在任何一種情況下，藍芽規範 [BTCorev4.1] 都沒有為上層測試儀和被測設備之間的通信提供安全機制。然而，攻擊者需要將設備(通過其中一種有線 HCI 類型)物理連接到被測設備，以便能夠與後者進行交互。

第 3.2.2 節中描述的 IPv6 鏈路本地地址配置僅顯示 6LBR 已經從鏈路層連接知道的 6LBR 的 6LN 訊息。這意味著使用藍芽隱私功能的設備在其 IPv6 鏈路本地地址中顯示與其設備地址相同的訊息。在藍芽級別不使用隱私的設備也不會在 IPv6 鏈路本地地址處擁有隱私。對於非鏈路本地地址，建議實現默認情況下不將藍芽設備地址嵌入 IID，而是支援，例如[RFC3315]，[RFC3972]，[RFC4941]，[RFC5535]或[RFC7217]。

惡意 6LN 可能試圖在低功耗藍芽網路上執行阻斷服務攻擊，例如，通過洪泛包。這種攻擊通過以下事實得以緩解：鏈路本地多播未在低功耗藍芽鏈路之間橋接，並且 6LBR 能夠通過智能使用低功耗藍芽 L2CAP 基於信用的流量控制來對每個 6LN 發送的封包進行速率限制機制。

5. 參考

5.1. 規範性引用

- [BTCorev4.1] Bluetooth Special Interest Group, "Bluetooth Core Specification Version 4.1", December 2013,
- [IPSP] Bluetooth Special Interest Group, "Bluetooth Internet Protocol Support Profile Specification Version 1.0.0", December 2014,
- [RFC2119] Bradner, S., "Key words for use in RFCs to Indicate Requirement Levels", BCP 14, RFC 2119, DOI 10.17487/RFC2119, March 1997,
- [RFC4291] Hinden, R. and S. Deering, "IP Version 6 Addressing Architecture", RFC 4291, DOI 10.17487/RFC4291, February 2006,
- [RFC4861] Narten, T., Nordmark, E., Simpson, W., and H. Soliman, "Neighbor Discovery for IP version 6 (IPv6)", RFC 4861, DOI 10.17487/RFC4861,

- September 2007,
- [RFC4862] Thomson, S., Narten, T., and T. Jinmei, "IPv6 Stateless Address Autoconfiguration", RFC 4862, DOI 10.17487/RFC4862, September 2007,
- [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,
- [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,
- [RFC7136] Carpenter, B. and S. Jiang, "Significance of IPv6 Interface Identifiers", RFC 7136, DOI 10.17487/RFC7136, February 2014,

5.2. 訊息參考

- [IEEE802] IEEE, "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks: Overview and Architecture", IEEE 802, DOI 10.1109/ieeestd.2002.93395, .
- [IEEE802.15.4] IEEE, "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)", IEEE 802.15.4, DOI 10.1109/ieeestd.2011.6012487, .
- [RFC3315] Droms, R., Ed., Bound, J., Volz, B., Lemon, T., Perkins, C., and M. Carney, "Dynamic Host Configuration Protocol for IPv6 (DHCPv6)", RFC 3315, DOI 10.17487/RFC3315, July 2003, .
- [RFC3610] Whiting, D., Housley, R., and N. Ferguson, "Counter with CBC-MAC (CCM)", RFC 3610, DOI 10.17487/RFC3610, September 2003, .
- [RFC3633] Troan, O. and R. Droms, "IPv6 Prefix Options for Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP) version 6", RFC 3633, DOI 10.17487/RFC3633, December 2003, .
- [RFC3972] Aura, T., "Cryptographically Generated

- Addresses (CGA)", RFC 3972, DOI 10.17487/RFC3972, March 2005, .
- [RFC4193] Hinden, R. and B. Haberman, "Unique Local IPv6 Unicast Addresses", RFC 4193, DOI 10.17487/RFC4193, October 2005, .
- [RFC4903] Thaler, D., "Multi-Link Subnet Issues", RFC 4903, DOI 10.17487/RFC4903, June 2007, .
- [RFC4941] Narten, T., Draves, R., and S. Krishnan, "Privacy Extensions for Stateless Address Autoconfiguration in IPv6", RFC 4941, DOI 10.17487/RFC4941, September 2007, .
- [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, .
- [RFC5535] Bagnulo, M., "Hash-Based Addresses (HBA)", RFC 5535, DOI 10.17487/RFC5535, June 2009, .
- [RFC7217] Gont, F., "A Method for Generating Semantically Opaque Interface Identifiers with IPv6 Stateless Address Autoconfiguration (SLAAC)", RFC 7217, DOI 10.17487/RFC7217, April 2014, .

致謝

The Bluetooth, Bluetooth Smart, and Bluetooth Smart Ready marks are registered trademarks owned by Bluetooth SIG, Inc.

Carsten Bormann, Samita Chakrabarti, Niclas Comstedt, Alissa Cooper, Elwyn Davies, Brian Haberman, Marcel De Kogel, Jouni Korhonen, Chris Lonvick, Erik Nordmark, Erik Rivard, Dave Thaler, Pascal Thubert, Xavi Vilajosana, and Victor Zhodzishsky provided valuable feedback for this document.

The authors would like to give special acknowledgements to Krishna Shingala, Frank Berntsen, and Bluetooth SIG's Internet Working Group for providing significant feedback and improvement proposals for this document.

Carles Gomez has been supported in part by the Spanish Government Ministerio de Economia y Competitividad through project TEC2012-32531, and FEDER.

Johanna Nieminen worked on this RFC in 2011-2012 while at Nokia and would like to thank Nokia for supporting the project.

貢獻者

Kanji Kerai, Jari Mutikainen, David Canfeng-Chen, and Minjun Xi from Nokia contributed significantly to this document.

作者資訊

Johanna Nieminen
TeliaSonera
Email: johannamaria.nieminen@gmail.com
Teemu Savolainen
Nokia
Visiokatu 3
Tampere 33720
Finland
Email: teemu.savolainen@nokia.com
Markus Isomaki
Nokia
Karaportti 2-4
Espoo 02610
Finland
Email: markus.isomaki@nokia.com
Basavaraj Patil
AT&T
1410 East Renner Road
Richardson, TX 75082
United States
Email: basavaraj.patil@att.com
Zach Shelby
ARM
150 Rose Orchard Way
San Jose, CA 95134

United States
Email: zach.shelby@arm.com
Carles Gomez
Universitat Politecnica de Catalunya/i2CAT
C/Esteve Terradas, 7 Castelldefels 08860
Spain
Email: carlesgo@entel.upc.edu