

10. RFC 7554 : Using IEEE 802.15.4e Time-Slotted Channel Hopping  
(TSCH) in the Internet of Things (IoT): Problem Statement  
RFC 7554 : 使用 IEEE 802.15.4e 時槽跳頻 (TSCH) 物聯網 (IoT) :  
問題陳述

網際網路工程任務組(IETF)  
Request for Comments : 7554  
分類 : 標準  
ISSN : 2070-172

T. Watteyne, Ed.  
Linear Technology  
M. Palattella  
University of Luxembourg  
L. Grieco  
Politecnico di Bari  
2015年5月

使用 IEEE 802.15.4e 時槽跳頻 (TSCH)  
物聯網 (IoT) : 問題陳述

摘要

本文描述了在低功耗和有損網路 (LLN) 環境中使用 IEEE 802.15.4e 的時槽通道跳頻 (TSCH) 媒體訪問控制 (MAC) 協定的環境，問題陳述和目標。本文中列舉的目標集僅形成初始集。

本文的狀態

本文不是網際網路標準跟踪規範；它出版是用於提供信息。

本文是網際網路工程任務組 (IETF) 的產品。它代表了 IETF 社區的共識。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。並非所有 IESG 批准的文件都適用於任何級別的網際網路標準；請參閱 RFC 5741 的第 2 部分。

有關本文的當前狀態，任何勘誤以及如何提供反饋的信息，請訪問

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

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。請仔細閱讀這些本文，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
2.	LLN背景下的TSCH	5
3.	問題和目標	6
3.1.	網路形成	7
3.2.	網路維護	7
3.3.	多跳拓撲	7
3.4.	路由和計時父母	8
3.5.	資源管理	8
3.6.	數據流控制	8
3.7.	確定性行為	8
3.8.	調度機制	9
3.9.	安全通訊	9
4.	安全考慮因素	9
5.	參考	9
5.1.	規範性參考文獻	9
5.2.	信息參考	10
附錄A	TSCH協定要點	14
A.1.	時槽	14
A.2.	訊號框	14
A.3.	節點TSCH時間表	14
A.4.	單元和束	15
A.5.	專用與共享單元	15
A.6.	絕對插槽號	16
A.7.	頻道跳躍	16

A.8.	時間同步	17
A.9.	能量消耗	18
A.10.	網路TSCH時間表	18
A.11.	加入流程	18
A.12.	信息要素	19
A.13.	擴充性	19
附錄B	TSCH 特徵	19
B.1.	無衝突通訊	19
B.2.	多通道與通道跳頻	19
B.3.	(連續) 同步的成本	20
B.4.	拓撲穩定性	20
B.5.	多個並發槽口	20
致謝		20
作者地址		21

## 1. 前言

IEEE 802.15.4e [IEEE.802.15.4e]於 2012 年發布，作為 IEEE 802.15.4 標準 (2011 年) [IEEE.802.15.4]定義的媒體訪問控制 (MAC) 協定的修正案。IEEE 802.15.4e 將被納入計劃於 2015 年發布的 IEEE 802.15.4 的下一版本。IEEE 802.15.4e 的時槽跳躍 (TSCH) 模式是本文的目標。術語“TSCH”指的是 [IEEE.802.15.4e] 中使用的 TSCH。

本文件描述了根據 [TERMS-6TiSCH] 中定義的術語，在 LLN 背景下採用 TSCH 所產生的主要問題。附錄 A 進一步概述了 IEEE 802.15.4e 的 TSCH 修正案的主要特徵。附錄 B 詳述了 TSCH 的功能，這可能對 6TiSCH WG 的工作很有意義。

TSCH 旨在使 IEEE 802.15.4 設備能夠支援廣泛的應用，包括但不限於工業應用 [IEEE.802.15.4e]。其核心是一種媒體訪問技術，它使用時間同步來實現低功耗操作和通道跳躍，以實現高可靠性。同步精度會影響功耗，並且可能會在幾微秒到幾毫秒之間變化，具體取決於解決方案。這與“傳統的”IEEE 802.15.4 MAC 協定非

常不同，因此更好地描述為“重新設計”。TSCH 不修改物理層，即它可以在符合 IEEE 802.15.4 的任何硬件上操作。

IEEE 802.15.4e 是針對 LLN 的最新一代超低功耗和可靠的網路解決方案。[RFC5673]討論了工業應用，並強調了 LLN 在工業環境中運行的嚴苛操作條件以及嚴格的可靠性，可用性和安全性要求。在這些環境中，具有大型（金屬）設備的大量部署環境會導致多徑衰落和乾擾，從而阻礙單通道解決方案可靠的任何嘗試；TSCH 的通道靈活性是其超高可靠性的關鍵。商用網路解決方案現已上市，其中節點平均消耗 10 個微安[CurrentCalculator]，端到端資料封包傳輸率超過 99.999%[Doherty07channel]。

IEEE 802.15.4e 設計用於低功耗約束設備，通常稱為“節點”。在 IETF 中使用了幾個術語來指代那些設備，包括“LLN 節點”[RFC7102]和“約束節點”[RFC7228]。在本文中，我們使用通用（和更短）術語“節點”，用作“LLN 節點”，“約束節點”或“node”的同義詞。

使 LLN 協定棧能夠在工業環境中運行，為這些網路開闢了新的應用領域。部署在智能城市的傳感器[RFC5548]將能夠安裝多年而無需更換電池。“傘”網路將互連智能建築中不同實體的智能元素[RFC5867]。剝離式開關將淘汰智能家居照明解決方案中昂貴的導管需求[RFC5826]。

TSCH 僅關注 MAC 層。這種干淨的分層允許 TSCH 適合支援 IPv6 的 LLN 協定棧，通過低功耗無線個域網（6LoWPAN）運行 IPv6 [RFC6282]，低功耗和有損網路的 IPv6 路由協定(RPL) [RFC6550] 和約束應用協定（CoAP）[RFC7252]。缺少的是負責調度要發送的訊號框的 TSCH 時槽的功能實體。在本文中，我們將此實體稱為“邏輯鏈路控制”（LLC），記住該實體的實現可以是不同類型的，包括分佈式協定或負責調度的集中式服務器。

雖然[IEEE.802.15.4e]定義了 TSCH 節點進行通訊的機制，但它沒有定義構建和維護通訊調度的策略，將該調度與 RPL 維護的多跳路徑相匹配，調整之間分配的資源。鄰居節點到數據業務流，對應用層生成的數據實施差異化處理，並對 6LoWPAN 和 RPL 發現

鄰居，對拓撲變化作出反應，自行配置 IP 地址或管理密鑰資料所需的信令訊息進行處理。

換句話說，TSCH 旨在允許優化和強大的自定義，簡化了 TSCH 與基於 IPv6，6LoWPAN 和 RPL 的協定棧的合併。

## 2. LLN 背景下的 TSCH

為了將 IP 層所需的服務映射到鏈路層提供的服務，使用適配層 [Palattella12standardized]。2007 年，6LoWPAN WG 開始研究通過 IEEE 802.15.4 網路傳輸 IPv6 資料封包的規範[RFC4919]。低功率無線個人區域網 (WPAN) 通常由大量電池供電設備組成，這些設備部署在先驗未知的位置。節點形成星形或網狀拓撲，並以低數據速率和使用短訊號框彼此通訊。鏈接的無線特性意味著它們本質上是不可靠的。節點大部分時間關閉其無線電介面以節省能量。鑑於這些特性，很明顯在低功率 WPAN 之上採用 IPv6 並不簡單，但對該適配層的優化提出了強烈要求。

例如，由於 IPv6 默認的最小 MTU 大小 (1280 位元組)，未分段的 IPv6 資料封包太大而無法容納在 IEEE 802.15.4 訊號框中。此外，由於 40 位元組長的 IPv6 報頭導致的開銷浪費了 PHY 層 [RFC4944] 上可用的稀缺頻寬。由於這些原因，6LoWPAN WG 定義了一個有效的適應層 [RFC6282]。進一步的問題包括 IPv6 地址的自動配置 [RFC2460] [RFC4862]，符合關於支持共享網路中鏈路層子網廣播的建議 [RFC3819]，減少路由和管理開銷 [RFC6606]，採用輕量級應用程式協定 (或新穎的數據編碼技術)，以及對安全機制的支持 (機密性和完整性保護，設備引導，密鑰建立和管理)。

這些功能可以在 TSCH 之上運行。但是，正如第 3 節所強調的那樣，有一些重要問題需要解決。

考慮到低功耗和有損無線電鏈路，電池供電節點，多跳網狀拓撲以及由於移動性導致的頻繁拓撲變化，6LoWPAN 的路由問題具有挑戰性。成功的解決方案考慮了具體的應用需求，以及 IPv6 行為和 6LoWPAN 機制 [Palattella12standardized]。ROLL WG 在 [RFC6550] 中定義了 RPL。RPL 可以支持各種各樣的鏈路層，包

括受限制，可能有損耗的鏈路層，或者通常與資源非常有限的主機或路由器設備一起使用，如建築/家庭自動化[RFC5867][RFC5826]，工業環境[RFC5673]和城市應用[RFC5548]。RPL 能夠快速構建網路路由，在節點之間分配路由知識，並適應不斷變化的拓撲。在典型設置中，節點通過多跳路徑連接到一小組根設備，這些設備通常負責數據收集和協調。對於它們中的每一個，通過計算鏈路成本，節點屬性/狀態信息和目標函數來創建面向目標的有向無環圖（DODAG），目標函數映射目標方案的優化要求。

拓撲基於秩度量設置，該度量編碼每個節點相對於其參考根的距離，如目標函數所指定。無論計算方式如何，Rank 沿著 DODAG 向根單調減小，構建梯度。RPL 包含不同類型的流量和信令信息。多點對點（MP2P）是 LLN 應用中的主要流量。數據被路由到具有一些應用相關性的節點，例如到較大網際網路的 LLN 網關或私有 IP 網路的核心。通常，這些目標是 DODAG 根，並充當分佈式監視應用程式的數據收集點。點對多點（P2MP）數據流用於驅動目的，其中訊息從 DODAG 根發送到目的節點。點對點（P2P）流量允許屬於同一 LLN 的兩個設備之間的通訊，例如傳感器和致動器。資料封包從這兩個通訊設備的源流向共同祖先，然後向下流向目的地。因此，RPL 必須髮現兩個向上路由（即，從節點到 DODAG 根）以便啟用 MP2P 和 P2P 流以及向下路由（即，從 DODAG 根到節點）以支持 P2MP 和 P2P 流量。

第 3 節強調了在 TSCH 之上使用 RPL 需要解決的挑戰。

圍繞 TSCH 開放的開源計劃，OpenWSN 項目[OpenWSN][OpenWSNETT]是基於標準的協定棧的第一個開源實現。該實現被用作 2011 年智能對象聯盟（IPSO）[IPSO]互操作性事件的 IP 的基礎。在沒有 TSCH 的標準化調度機制的情況下，使用了“時槽 Aloha”時間表。

### 3. 問題和目標

如附錄 A 中所強調的，TSCH 因其預定性質而與其他低功率 MAC 協定不同。TSCH 定義了執行通訊調度的機制；然而，正是實體

設置了控制網路拓撲的時間表。該調度實體還控制分配給該拓撲中的每個鏈路的資源。

該實體應如何運作超出了 TSCH 的範圍。本節的其餘部分重點介紹了該實體需要解決的問題。為簡單起見，我們通過通用名稱“LLC”來引用該實體。注意，當前在[SUBLAYER-6top]中定義的 6top 子層可以被視為該通用“LLC”的實施例。

LLC 需要針對的一些問題可能與其他協定的範圍重疊（例如，6LoWPAN，RPL 和 RSVP）。在這種情況下，LLC 將從其他協定提供的服務中獲益，以實現這些目標。

### 3.1. 網路形成

LLC 需要控制網路的形成方式，包括新節點如何加入以及已加入的節點如何通告網路的存在。LLC 需要：

1. 定義增強信標（EB）[IEEE.802.15.4e]中包含的信息元素，宣傳網路的存在。
2. （對於新節點），定義處理和過濾接收到的 EB 的規則。
3. 定義加入程式。這可能包括為節點分配唯一的 16 位地址和初始密鑰材料管理的機制。
4. 定義一種機制來保護加入過程以及隨後安排更多通訊單元的可選過程。

### 3.2. 網路維護

一旦形成網路，LLC 就需要維持網路的健康狀況，從而允許節點保持同步。LLC 需要：

1. 管理每個節點的時間源鄰居。
2. 為節點定義一種機制，以更新它在 EB 中宣布的連接優先級。
3. 安排 EB 的傳輸以宣傳網路的存在。

### 3.3. 多跳拓撲

在給定加權連通圖的情況下，RPL 確定多跳路由。LLC 需要：

1. 定義一種機制來收集拓撲信息，節點和鏈路狀態，然後它可以提供給 RPL。
2. 確保 TSCH 調度包含由 RPL 標識的多跳路由的小區（TSCH 調度中的小區是資源的原子“單元”，參見第 3.5 節）。
3. 在適用的情況下，維護獨立的單元集以傳輸獨立的數據流。

### 3.4. 路由和計時父母

在任何時候，TSCH 節點都需要具有可以同步的時間源鄰居。因此，LLC 需要分配時間源鄰居以允許 TSCH 網路的正確操作。可以或不可以從 RPL 路由父集中獲取時間源鄰居。

### 3.5. 資源管理

TSCH 調度中的單元是資源的原子“單元”。在鄰居節點之間分配的小區數量需要適合於業務流的大小。LLC 需要：

1. 為鄰居節點定義一種機制，以交換有關其時間表的信息，並在適用的情況下協商單元的添加/刪除。
2. 允許實體（例如，一組設備，分佈式協定，路徑計算元件（PCE）等）來控制調度。

### 3.6. 數據流控制

TSCH 定義了節點在無法接受傳入資料封包時發出信號的機制。

但是，它不會定義確定何時停止接受資料封包的策略。LLC 需要：

1. 允許實施和配置策略以對傳入和傳出的資料封包進行排隊。
2. 管理緩衝區空間，並向 TSCH 指示何時停止接收傳入的資料封包。
3. 處理失敗的傳輸。當 TSCH 多次重傳資料封包而沒有收到確認時，傳輸被宣告失敗。這包括專用和共享單元。

### 3.7. 確定性行為

正如[RFC5673]中所強調的那樣，在某些應用中，數據是周期性生成的，並且具有易於理解的數據頻寬要求，這是確定性和可預測的。LLC 需要：

1. 確保在可能由應用程式確定的截止日期之前將數據傳送到其最終目的地。
2. 為這種確定性流動提供一種機制，使其與不同優先級的突發或不頻繁的交通流共存。

### 3.8. 調度機制

可以設想幾種調度機制，並且可以在同一網路中共存。例如，[RPL] 描述了如何通過外部 PCE [RFC4655] 優化頻寬分配。在 [TASA-PIMRC] 中定義了另一種集中式（基於 PCE）流量感知調度算法。或者，兩個鄰居節點可以通過監視業務量並在需要時協商對額外小區的分配來自主地調整小區的數量。在 [Tinka10decentralized] 中提供了分散算法的示例（即，不需要 PCE）。該機制可用於以類似於 RSVP [RFC2205] 的方式建立多跳路徑。LLC 需要：

1. 為兩個設備提供協商分配的機制並在它們之間釋放細胞。
2. 為設備提供監控和管理的機制幾個節點的節點的能力。
3. 為這些不同的調度機制定義機制在同一個網路中共存。

### 3.9. 安全通訊

給定一些密鑰材料，TSCH 定義了加密和驗證 MAC 訊號框的機制。它沒有定義如何生成這種密鑰材料。LLC 需要：

1. 定義新節點加入現有網路所需的密鑰材料和認證機制。
2. 定義允許在鄰居節點之間安全傳輸應用程式數據的機制。
3. 定義一種機制，允許在節點和 LLC 之間安全地傳輸信令數據。

## 4. 安全考慮因素

本備忘錄是現有標準的信息概述，未定義任何新機制或協定。它確實描述了 6TiSCH WG 定義安全解決方案的必要性。特別是，第 3.1 節描述了連接過程中的安全性。第 3.9 節討論了數據訊號框保護。

## 5. 參考

### 5.1. 規範性參考文獻

[IEEE.802.15.4]

IEEE, “用於本地和城域網的IEEE標準 - 第15.4部分：低速率無線個人區域網路”, IEEE標準。802.15.4-2011, 2011年9月。

[IEEE.802.15.4e]

IEEE, “IEEE本地和城域網標準 - 第15.4部分：低速率無線個域網 (LR-WPAN) 修正案1：MAC子層”, IEEE標準。802.15.4e-2012, 2012年4月。

## 5.2. 信息參考

[CurrentCalculator] Linear Technology, "Application Note: Using the Current Calculator to Estimate Mote Power", August 2012, .

[Doherty07channel] Doherty, L., Lindsay, W., and J. Simon, "Channel-Specific Wireless Sensor Network Path Data", IEEE International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN), pp. 89-94, 2007.

[IPSO] IPSO Alliance, "IP for Smart Objects Alliance Homepage", .

[OpenWSN] "Berkeley's OpenWSN Project Homepage", .

[OpenWSNETT] Watteyne, T., Vilajosana, X., Kerkez, B., Chraim, F., Weekly, K., Wang, Q., Glaser, S., and K. Pister, "OpenWSN: A Standards-Based Low-Power Wireless Development Environment", Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, Volume 23: Issue 5, August 2012.

[Palattella12standardized] Palattella, MR., Accettura, N., Vilajosana, X., Watteyne, T., Grieco, LA., Boggia, G., and M. Dohler, "Standardized

Protocol Stack For The Internet Of (Important) Things", IEEE Communications Surveys and Tutorials, Volume: 15, Issue 3, December 2012.

- [RFC2205] Braden, R., Ed., Zhang, L., Berson, S., Herzog, S., and S. Jamin, "Resource ReSerVation Protocol (RSVP) -- Version 1 Functional Specification", RFC 2205, DOI 10.17487/RFC2205, September 1997, .
- [RFC2460] Deering, S. and R. Hinden, "Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification", RFC 2460, DOI 10.17487/RFC2460, December 1998, .
- [RFC3819] Karn, P., Ed., 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, DOI 10.17487/RFC3819, July 2004, .
- [RFC4655] Farrel, A., Vasseur, J., and J. Ash, "A Path Computation Element (PCE)-Based Architecture", RFC 4655, DOI 10.17487/RFC4655, August 2006, .
- [RFC4862] Thomson, S., Narten, T., and T. Jinmei, "IPv6 Stateless Address Autoconfiguration", RFC 4862, DOI 10.17487/RFC4862, September 2007, .
- [RFC4919] Kushalnagar, N., Montenegro, G., and C. Schumacher, "IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs): Overview, Assumptions, Problem Statement, and Goals", RFC 4919, DOI 10.17487/RFC4919, August 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, .

- [RFC5548] Dohler, M., Ed., Watteyne, T., Ed., Winter, T., Ed., and D. Barthel, Ed., "Routing Requirements for Urban Low-Power and Lossy Networks", RFC 5548, DOI 10.17487/RFC5548, May 2009, .
- [RFC5673] Pister, K., Ed., Thubert, P., Ed., Dwars, S., and T. Phinney, "Industrial Routing Requirements in Low-Power and Lossy Networks", RFC 5673, DOI 10.17487/RFC5673, October 2009, .
- [RFC5826] Brandt, A., Buron, J., and G. Porcu, "Home Automation Routing Requirements in Low-Power and Lossy Networks", RFC 5826, DOI 10.17487/RFC5826, April 2010, .
- [RFC5867] Martocci, J., Ed., De Mil, P., Riou, N., and W. Vermeulen, "Building Automation Routing Requirements in Low-Power and Lossy Networks", RFC 5867, DOI 10.17487/RFC5867, June 2010, .
- [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, .
- [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, .
- [RFC6606] Kim, E., Kaspar, D., Gomez, C., and C. Bormann, "Problem Statement and Requirements for IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Network (6LoWPAN) Routing", RFC 6606, DOI 10.17487/RFC6606, May 2012, .
- [RFC7102] Vasseur, JP., "Terms Used in Routing for

Low-Power and Lossy Networks", RFC 7102,  
DOI 10.17487/RFC7102, January 2014, .

- [RFC7228] Bormann, C., Ersue, M., and A. Keranen,  
"Terminology for Constrained-Node Networks",  
RFC 7228, DOI 10.17487/RFC7228, May  
2014, .
- [RFC7252] Shelby, Z., Hartke, K., and C. Bormann, "The  
Constrained Application Protocol (CoAP)", RFC  
7252, DOI 10.17487/RFC7252, June 2014, .
- [RPL] Phinney, T., Thubert, P., and R. Assimiti, "RPL  
applicability in industrial networks", Work in  
Progress,  
draft-ietf-roll-rpl-industrial-applicability-02,  
October 2013.
- [SUBLAYER-6top] Wang, Q., Vilajosana, X., and T. Watteyne,  
"6TiSCH Operation Sublayer (6top)", Work in  
Progress, draft-wang-6tisch-6top-sublayer-01,  
July 2014.
- [TASA-PIMRC] Palattella, MR., Accettura, N., Dohler, M.,  
Grieco, LA., and G. Boggia, "Traffic Aware  
Scheduling Algorithm for reliable low-power  
multi-hop IEEE 802.15.4e networks", IEEE 23rd  
International Symposium on Personal, Indoor  
and Mobile Radio Communications (PIMRC),  
pp. 327-332, September 2012.
- [TERMS-6TISCH] Palattella, M., Thubert, P., Watteyne, T., and  
Q. Wang, "Terminology in IPv6 over the TSCH  
mode of IEEE 802.15.4e", Work in Progress,  
draft-ietf-6tisch-terminology-04, March 2015.
- [Tinka10decentralized] Tinka, A., Watteyne, T., and K. Pister, "A  
Decentralized Scheduling Algorithm for Time  
Synchronized Channel Hopping", Ad Hoc  
Networks, 2010.

[Watteyne09reliability] Watteyne, T., Mehta, A., and K. Pister, "Reliability Through Frequency Diversity: Why Channel Hopping Makes Sense", Proceedings of the 6th ACM Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks (PE-WASUN), pp. 116-123, October 2009.

## 附錄A TSCH 協定要點

本附錄概述了 IEEE 802.15.4e TSCH 修正案的主要功能。它沒有嘗試重複標準，而是側重於以下內容：

- 與其他 IEEE 802.15.4 網路完全不同的概念，可能需要精確定義和呈現它們。
- 作為 IEEE 802.15.4e 一部分的技術和想法，可能對 6TiSCH WG 的工作有用。

### A.1. 時槽

TSCH 網路中的所有節點都是同步的。時間被分成時間段。時槽足夠長，以使最大尺寸的 MAC 訊號框從節點 A 發送到節點 B，並且節點 B 用表示成功接收的確認 (ACK) 訊號框進行應答。

時間段的持續時間不是由標準定義的。對於符合 IEEE 802.15.4 的 2.4 GHz 頻段工作的無線電，127 位元組的最大長度訊號框需要大約 4 ms 才能傳輸；較短的 ACK 大約需要 1 毫秒。使用 10 ms 的時槽（典型的持續時間），這將為無線電周轉，資料封包處理和安全操作留出 5 ms 的時間。

### A.2. 訊號框

時槽被分組為一個或多個時槽訊號框。隨著時間的推移，一個老虎機不斷重複。TSCH 沒有強加一個時槽訊號框大小。根據應用需求，這些時間範圍可以從 10 到 1000。時槽越短，時槽重複的頻率越高，導致可用頻寬越多，但功耗也越高。

### A.3. 節點 TSCH 時間表

TSCH 調度指示每個節點在每個時槽中做什麼：發送，接收或休眠。對於每個調度（發送或接收）小區，該調度表示 channelOffset 和要與之通訊的鄰居的地址。一旦節點獲得其計劃，它就會執行它：

- 對於每個發送信元，該節點檢查輸出緩衝器中是否存在與該時槽的調度信息中寫入的鄰居匹配的分組。如果沒有，則節點在時槽期間保持其無線電關閉。如果有，則節點可以請求鄰居確認它，在這種情況下，它必須在發送之後監聽確認。
- 對於每個接收單元，節點偵聽可能的傳入資料封包。如果在一段收聽期後沒有收到，它會關閉收音機。如果收到資料封包，尋址到該節點並通過安全檢查，則該節點可以發回確認。

如何構建，更新和維護計劃，以及由哪個實體超出 IEEE 802.15.4e 標準的範圍。

#### A.4. 單元和束

假設調度很好，如果節點 A 被調度為在 slotOffset 5 和 channelOffset 11 發送到節點 B，則節點 B 將被調度為在相同的 slotOffset 和 channelOffset 處從節點 A 接收。

假設調度很好，如果節點 A 被調度為在 slotOffset 5 和 channelOffset 11 發送到節點 B，則節點 B 將被調度為在相同的 slotOffset 和 channelOffset 處從節點 A 接收。

如果有大量數據從節點 A 流向節點 B，則調度可能在不同時間包含從 A 到 B 的多個單元。調度到同一鄰居的多個小區可以是等效的，即，在將分組放入 MAC 隊列之後，MAC 層在這些小區中的任何一個上首先顯示該分組。兩個鄰居 A 和 B 之間的所有單元的並集稱為“捆綁”。由於時槽訊號框隨時間重複（並且時槽訊號框的長度通常是恆定的），因此每個單元給予給定鄰居頻寬的“量子”。修改捆綁中等效單元的數量會修改兩個鄰居之間分配的資源量。

#### A.5. 專用與共享單元

默認情況下，TSCH 調度內的每個調度的發送信元是專用的，即僅保留給節點 A 以發送到節點 B。IEEE 802.15.4e 還允許將信元標記為共享。在共享小區中，多個節點可以在相同頻率上同時發送。為了避免爭用，TSCH 定義了共享小區的退避算法。

可以將調度的小區標記為發送和接收。在這種情況下，如果節點在其輸出緩衝器中具有適當的分組，則節點發送，否則偵聽。將單元標記為[發送，接收，共享]會導致時槽 - Aloha 行為。

## A.6. 絕對插槽號

TSCH 定義了一個稱為絕對時槽號 (ASN) 的時槽計數器。創建新網路時，ASN 初始化為 0；從那時起，它在每個時槽增加 1。詳細地：

$$\text{ASN} = (k * S + t)$$

其中 k 是時槽訊號框週期（即，自網路啟動以來的時槽訊號框重複次數），S 是時槽訊號框大小，t 是 slotOffset。節點在加入網路時學習當前 ASN。由於節點是同步的，因此它們都可以隨時知道 ASN 的當前值。ASN 被編碼為一個 5 位元組的數字：這允許它增加數百年（確切的值取決於時間段的持續時間）而不會包裹。ASN 用於計算通訊頻率，可用於與安全相關的操作。

## A.7. 頻道跳躍

對於每個計劃的單元格，計劃指定 slotOffset 和 channelOffset。在精心構建的調度中，當節點 A 在 channelOffset 5 上具有到節點 B 的發送小區時，節點 B 在相同的 channelOffset 上具有來自節點 A 的接收小區。channelOffset 由兩個節點使用以下函數轉換為頻率：

$$\text{frequency} = F \{(\text{ASN} + \text{channelOffset}) \bmod \text{nFreq}\}$$

函數 F 由包含可用通道集的查找表組成。值 nFreq（可用頻率的數量）是此查找表的大小。存在與可用頻率一樣多的 channelOffset 值（例如，當使用在 2.4GHz 時符合 IEEE 802.15.4 的無線電時，當使用所有通道時為 16）。由於兩個節點在其調度的小區和相同的 ASN 計數器的調度中都寫入了相同的 channelOffset，因此它們計算相同的頻率。然而，在時槽訊號框的下一次迭代（週期）

中，當 channelOffset 相同時，ASN 已經改變，導致計算不同的頻率。

這導致“通道跳躍”：即使使用靜態調度，在通訊時，鄰居對在不同頻率之間“跳躍”。確保在所有可用頻率上進行通訊的方法是將時槽訊號框中的時槽數設置為素數。通道跳頻是一種已知的有效對抗多徑衰落和外部干擾的技術 [Watteyne09reliability]。

## A.8. 時間同步

由於 TSCH 網路中通訊的時槽性質，節點必須保持緊密同步。假設所有節點都配有時鐘以跟踪時間。然而，因為不同節點中的時鐘相對於彼此漂移，所以鄰居節點需要周期性地重新同步。

每個節點需要周期性地將其網路時鐘同步到另一個節點，並且還向其鄰居提供其網路時間。由管理調度的實體決定為每個節點分配足夠的時間源鄰居，即，在調度中指示哪個鄰居是其“時間源鄰居”。在設置時間源鄰居時，重要的是避免同步循環，這可能導致形成獨立的同步節點集群。

TSCH 在所有交換的資料封包（數據訊號框和 ACK 訊號框）中添加定時信息。這意味著只要交換數據，鄰居節點就可以彼此重新同步。詳細地，在 IEEE 802.15.4e (2012) 中定義了兩種方法，用於允許設備在 TSCH 網路中同步：(i) 基於確認和 (ii) 基於訊號框的同步。在這兩種情況下，接收器計算訊號框到達的預期時間與其實際到達之間的時間差。在基於確認的同步中，接收器在其確認中向發送器節點提供這樣的信息。在這種情況下，發送方節點與接收方的時鐘同步。在基於訊號框的同步中，接收器使用計算的 delta 來調整其自己的時鐘。在這種情況下，接收器節點與發送器的時鐘同步。

可以使用不同的同步策略。節點可以通過交換 EB 來保持同步。節點也可以通過週期性地向時間源鄰居發送有效訊號框並使用確認重新同步來保持同步。兩種方法（或其組合）都是有效的同步策略；使用哪一個取決於網路要求。

## A.9. 能量消耗

節點在一個時槽中只能執行少量活動：傳輸，接收或休眠。這些操作中的每一個都有一些與之相關的能源成本；確切的值取決於使用的硬件。給定節點的調度，可以直接計算該節點的預期平均功耗。

## A.10. 網路 TSCH 時間表

該調度完全定義了節點之間的同步和通訊。通過在鄰居之間添加/移除單元，可以使計劃適應應用程式的需要。直觀的例子是：

- 為節點需要消耗盡可能少的能量的應用程式制定“稀疏”計劃，以降低頻寬為代價。
- 為節點生成大量數據的應用程式制定“密集”計劃，但代價是功耗增加。
- 沿多跳路由添加更多小區，許多資料封包流經多路徑。

## A.11. 加入流程

已經是網路一部分的節點可以周期性地發送 EB 訊號框以宣告網路的存在。它們包含有關網路中使用的時槽大小，當前 ASN，有關信標節點正在偵聽的時槽訊號框和時槽的信息以及 1 位元組連接優先級的信息。連接優先級字段提供信息以更好地決定要加入哪個節點。即使節點配置為在同一 channelOffset 上發送所有 EB 訊號框，由於附錄 A.7 中描述的 TSCH 的通道跳躍特性，該 channelOffset 在不同的時槽訊號框週期轉換為不同的頻率。結果，EB 訊號框在所有頻率上發送。

希望加入網路的節點偵聽 EB。由於 EB 在所有頻率上發送，因此加入節點可以在任何頻率上監聽，直到它聽到 EB。它所監聽的頻率是特定於實現的。一旦它接收到一個或多個 EB，新節點就啟用 TSCH 模式，並使用來自 EB 的 ASN 和其他定時信息來同步到網路。使用來自 EB 的時槽訊號框和小區信息，它知道如何聯系網路中的其他節點。

IEEE 802.15.4e TSCH 標準沒有定義超出該網路“bootstrap”的步驟。

## A.12. 信息要素

TSCH 引入了信息元素 (IE) 的概念。IE 是放置在 MAC 頭末尾的 Type-Length-Value 容器的列表。為 TSCH 定義了少量類型 (例如, EB 中的 ASN 包含在 IE 中), 並且非管理範圍可用於擴充。

MAC 報頭中的數據位指示訊號框是否包含 IE。IE 被分組為由 MAC 層消耗的頭部 IE, 因此通常對下一個更高層是不可見的, 並且有效載荷 IE 被傳遞到下一個更高層, 可能之後是常規有效載荷。因此, 有效載荷 IE 可以用於兩個相鄰節點的下一個更高層以交換信息。

## A.13. 擴充性

TSCH 標準旨在可擴充。它將機制引入“構建塊”(例如, 單元, 束, 槽框等), 但是為上層留下了完全的自由度來組裝它們。可以通過定義新的標頭 IE 來擴充 MAC 協定。可以定義中間層以通過定義新的有效載荷 IE 來管理 MAC 層。

## 附錄B TSCH 特徵

本節詳細介紹了 TSCH 的功能, 這可能對 6TiSCH WG 的工作很有意義。它沒有定義任何要求。

### B.1. 無衝突通訊

TSCH 允許人們設計一個產生無衝突通訊的時間表。這是通過以這樣的方式構建具有專用小區的調度來完成的, 即最多一個節點與每個 slotOffset / channelOffset 小區中的特定鄰居通訊。多對鄰居節點可以同時交換數據, 但是在不同的頻率上。

### B.2. 多通道與通道跳頻

TSCH 調度看起來像寬度“時槽訊號框大小” $S$  和高度“頻率數” $nFreq$  的矩陣。對於調度算法, 可以將單元視為要調度的原子

“單元”。特別是，由於 TSCH 的通道跳躍特性，調度算法不應該擔心實際頻率通訊發生，因為它在每個時槽訊號框迭代時改變。

### B.3. (連續) 同步的成本

當網路中存在流量時，使用它們交換的數據訊號框隱式通訊的節點重新同步。在沒有數據流量的情況下，節點需要定期與其時間源鄰居同步，以免在時間上漂移。如果它們一段時間沒有通訊(通常是 30 秒)，節點可以交換虛擬數據訊號框以重新同步。需要傳輸此類訊息的頻率取決於時鐘源的穩定性以及每個節點“早期”開始監聽數據的方式(“保護時間”)。理論上，使用 10 ppm 時鐘和 1 ms 保護時間，此時間段可以為 100 s。假設這種交換導致節點的無線電開啟 5ms，這產生了一個無線電佔空比，以保持同步  $5\text{ms} / 100\text{s} = 0.005\%$ 。雖然 TSCH 確實要求節點定期重新同步，但這樣做的成本非常低。

### B.4. 拓撲穩定性

TSCH 的通道跳躍性質導致鏈路非常“穩定”。諸如多徑衰落和外部干擾之類的無線現象在每個頻率上以不同方式影響兩個節點之間的無線鏈路。如果從節點 A 到節點 B 的傳輸失敗，則在不同頻率上的重傳具有在相同頻率上成功重傳的可能性。結果，即使當某些頻率“表現不好”時，通道跳變也“平滑”每個頻率的貢獻，從而產生更穩定的鏈路並因此產生更穩定的拓撲。

### B.5. 多個並發槽口

TSCH 標準允許多個時槽訊號框在節點的時間表中共存。在某個時槽，節點可能調度多個活動(例如，在時槽訊號框 2 上發送到節點 B，從時槽訊號框 1 上的節點 C 接收)。為了處理這種情況，TSCH 標準定義了以下優先規則：

1. 傳輸優先於接收；
  2. 較低的時槽訊號框標識符優先於較高的時槽訊號框標識符。
- 在上面的示例中，節點將在時槽訊號框 2 上發送到節點 B。

致謝

特別感謝 Dominique Barthel , Patricia Brett , Guillaume Gaillard , Pat Kinney , Ines Robles , Timothy J. Salo , Jonathan Simon , Rene Struik 和 Xavi Vilajosana 審閱文件並提供有價值的反饋。感謝第 7 框架計劃（格蘭特 288445）的 IoT6 歐洲項目（STREP）。

作者地址

Thomas Watteyne (editor)  
Linear Technology  
32990 Alvarado-Niles Road, Suite 910  
Union City, CA 94587  
United States

Phone: +1 (510) 400-2978  
EMail: [twatteyne@linear.com](mailto:twatteyne@linear.com)

Maria Rita Palattella  
University of Luxembourg  
Interdisciplinary Centre for Security,  
Reliability and Trust  
4, rue Alphonse Weicker  
Luxembourg L-2721  
Luxembourg

Phone: +352 46 66 44 5841  
EMail: [maria-rita.palattella@uni.lu](mailto:maria-rita.palattella@uni.lu)

Luigi Alfredo Grieco  
Politecnico di Bari  
Department of Electrical and Information  
Engineering  
Via Orabona 4  
Bari 70125  
Italy

Phone: +39 08 05 96 3911  
EMail: [a.grieco@poliba.it](mailto:a.grieco@poliba.it)