



淺談無線通訊技術發展與同步安全議題

張楷珉^{*}

國立中央大學通訊工程學系碩士生

摘要

本文從歷史角度，回顧了第一代到第五代無線通訊技術發展；並以規範與標準為時序，探討傳輸實體層的實現、性能指標和各種新服務所需的同步要求。第五代無線通訊網路無疑在無線世界掀起一場革命，它實現高傳輸速率、高頻譜效率、多設備連接、低端到端時延和高可靠性的通訊品質。然而，掀起這場革命的同時，新的傳輸實體層架構以及同步需求取決於新的應用與服務；因此，規範與標準的制定益趨向於應用與服務導向。本文藉由通訊發展史，協定與標準制定的軌跡，探討第五代通訊的技術發展與同步時脈網路面臨的安全議題。

關鍵詞：無線通訊、傳輸實體層、同步、第五代無線通訊的基地臺、行動通訊

^{*} 通訊作者：張楷珉

電子郵件：aatt588588@gmail.com

（收件日期：2021 年 12 月 17 日；修正日期：2022 年 1 月 21 日；接受日期：2022 年 1 月 26 日）



Historical Perspective of Wireless Communication and Secure Synchronization Techniques

Kai-Min Jhang^{*}

Master student, Department of Communication Engineering, National Central University

Abstract

This article addresses synchronization techniques for wireless communications. In a historical viewpoint, the synchronizations required for first generation (1G) to fifth generation (5G) mobile communications to achieve performance metrics and provide various new services are reviewed. New synchronization specifications/standardizations may depend on specific applications; therefore, growing application- or service-oriented. New challenges occurred within the synchronization techniques are also raised.

Keywords: Wireless Communication, Physical Layer, Synchronization, eNB, mobile communication

^{*} Corresponding Author: Kai-Min Jhang
E-mail: aatt588588@gmail.com

壹、無線通訊技術發展史

新一代的行動通訊 (Mobile Communication) (或是無線通訊 [Wireless Communication]) 的崛起，必濫觴於傳輸實體層 (Physical Layer) 的內接收機 (Inner Receiver) 技術先發展成熟；而同步 (Synchronization) 子系統則是內接收技術中最重要的一環。自 1980 年代出現第一代 (First Generation, 1G) 行動通訊系統以來，行動通訊不斷演進。在 1G 行動通訊時期，最重要的創新包括蜂巢結構 (Cellular Structure)、頻率複用概念 (Frequency Reuse) 和蜂巢規劃策略 (Cell Planning Strategy)。在美國，由美國電報電話公司 (AT&T) 的子公司所開發的先進行動電話服務系統 (Advanced Mobile Phone Service, AMPS) 是 1G 行動通訊的代表系統 (〈類比式行動電話系統〉，2019)。AMPS 採用頻分多重存取 (Frequency Division Multiple Access, FDMA)、頻分雙工 (Frequency-Division Duplexing, FDD)、調頻 (Frequency Modulation, FM) 和每鏈路一萬五千赫茲 (15 kHz) 來支持電信流量 (Telecommunication Traffic)，也就是所謂的即時語音 (Real-Time Voice)。在 1G 行動通訊時期，載波相位同步 (Carrier Phase Synchronization)，以實現寬帶調頻 (Wideband FM) 通訊系統中的同調解調 (Coherent Demodulation)，並能抑制鄰道干擾 (Adjacent Channel Interference) (Gardner, 1984; Ziemer and Tranter, 2014)。

由 1G 行動通訊邁向第二代 (Second Generation, 2G) 行動通訊網路的創新技術包括訊息格式 (Information Format) 從類比調變 (Analog Modulation) 到數位調變 (Digital Modulation) 的演變。代表性的 2G 行動通訊網路是全球移動通訊系統 (Global System for Mobile Communications, GSM) (〈GSM〉，2021)。GSM 通訊系統採用時分多重存取 (Time-Division Multiple Access, TDMA)、時分雙工 (Time-Division Duplex, TDD)、高斯最小頻移鍵控 (Gaussian Minimum-Shift Keying, GMSK)，和每鏈路頻寬一百五十萬赫茲 (1.5 MHz) 來支持比 1G 更好的話務通訊品質。TDMA 是一種為實現共享傳輸介質 (一般是無線電領域) 或者網路的通訊技術，它允許多個用戶在不同時槽來使用相同的頻率，讓多用戶共享同樣的傳輸媒體 (例如：無線電頻率) (〈分時多工〉，2018)；TDD 是利用時間分隔多工技術來分隔傳送及接收的訊號，它利用一個半雙工的傳輸來類比全雙工的傳輸過程，可以根據上傳及下載的資料量動態的調整對應的頻寬 (“Test-Driven Development,” 2022)；GMSK 則是一種典型的連續相位調變方式，其因具有很好的頻譜效率而在無線通信領域得到廣泛應用。(〈GMSK〉，2015) 過採樣技術 (Oversampling) 用於時序同步 (Timing Synchronization) 以減少符際干擾 (Intersymbol Interference, ISI)。由於 2G 行動通訊系統中訊息已經數位化，通道編碼 (Channel Coding) 技術可以應用於糾錯 (Error Correction)，糾錯編碼 (Error-Correction Coding) (S. Lin and Costello, 2005)、符元時序同步 (Symbol Timing Synchronization) (Mengali and D’Andrea, 1997) 和調適性等化 (Adaptive Equalization) (Haykin, 2002; Widrow and Stearns, 1985) 技術成為 1990 年代的最熱門的研發議題；而在網路端，交換機房 (Switch Center) 也逐步由類比交換設備汰換為數位交換設備。直到 2000 年初期，為了達成以無線方式傳輸數據通訊，例如：手機上網，鈴聲下載，單一鏈路需使用較大的頻寬 (五百萬赫茲)，特徵時間 (Signature Duration) 進一步縮短到傳播通道 (Channel) 延遲擴展 (Delay Spread) 的水平，因此接收機必須考慮寬帶傳輸 (Wideband

Transmission)。因此，在第三代(Third Generation, 3G)行動通訊中導入，並考慮了多重路徑衰落(Multipath Fading)在通信系統中，由於通信地面站天線波束較寬，受地物、地貌和海況等諸多因素的影響，使接收機收到經折射、反射和直射等幾條路徑到達的電磁波，這種現象就是多徑效應。這些不同路徑到達的電磁波射線相位不一致且具有時變性，導致接收信號呈衰落狀態；這些電磁波射線到達的時延不同，又導致碼間干擾。若多射線強度較大，且時延差不能忽略，則會產生誤碼，這種誤碼靠增加發射功率是不能消除的，而由此多徑效應產生的衰落叫多徑衰落，它也是產生碼間干擾的根源(“Multipath propagation,” 2021)。此時，多重存取干擾(Multiple-Access Interference, MAI)成為另一個重要問題，因為碼分多址(Code-Division Multiple Access, CDMA)網路工作效能的瓶頸來自於多用戶之間的干擾(Castoldi, 2002)。用於故有頻率分集(Frequency Diversity)的犁耙式接收機(Rake Receiver)、用於抑制多重存取干擾的多天線波束成形(Beamforming)技術和多用戶檢測(Multi-User Detection, MUD)成為演進3G行動通訊的重要研發議題。第三代合作夥伴計劃(3GPP)提出IMT-2000，後來由美國幾間公司所組成的3GPP2提出CDMA-2000是3G行動通訊網路的代表系統。寬帶碼分複接多重存取(Wideband CDMA)每條鏈路五百萬赫茲(5 MHz)的頻寬來傳輸多媒體流量；尤其是新增了數據傳輸。擬似亂碼(Pseudonoise Code, PN code)同步(J.-C. Lin, 2002a, 2002b)，其中執行於行動臺的蜂巢辨識碼偵測(Wang and Ottosson, 2000)，在寬帶碼分多重存取通訊系統中起著重要作用。在寬帶碼分多重存取／通用行動通訊系統(Universal Mobile Telecommunications System, UMTS)中，使用4個PN序列，每個PN序列為64個碼片，用於實現時槽同步(Slot Synchronization)、訊框同步(Frame Synchronization)和頻率擷取(Frequency Acquisition)。從3G行動通訊網路到第四代(Fourth Generation, 4G)行動通訊網路的演進過程中，頻譜效率提升、多輸入多輸出(Multi-Input Multi-Output, MIMO)技術、載波聚合(Carrier Aggregation, CA)和資源管理(Resource Management)在2010年代引起了相當大的研究興趣(Yuan, Zhang, Wang, and Yang, 2010)。3GPP先進長期演進(Long Term Evolution-Advanced, LTE-A)(3GPP第10版及以後版本)是4G行動通訊的代表網路系統。LTE採用20 MHz帶寬、2,048個子載波、正交分頻調變(Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, OFDM)、正交頻分多址(Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA)的下行鏈路傳輸和單載波頻分多址(Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access, SC-FDMA)上行鏈路傳輸。LTE-A可以聚合五個20 MHz帶寬的載波成為最高達到100 MHz的載波。扇區搜索(Sector Search)、蜂巢搜索(Cell Search)和隨機存取通道(Physical Random Access Channel, RACH)仍然是關於4G無線通訊網路的同步機制廣泛研究的議題(J.-C. Lin, 2018; J.-C. Lin, Sun, and Poor, 2016; Tsai, Zhang, Grieco, and Ozturk, 2007)。

上面的討論說明傳輸實體層技術在任何行動通訊網路崛起扮演了關鍵角色，而同步機制則是最為重要的基石，例如：應用於1G行動通訊中載波同步、2G行動通訊中的符元同步、3G行動通訊的擬似亂碼同步和4G行動通訊中的扇區搜索。5G無線通訊網路的架構進一步升級，以在具有軟體定義網路(Software-Defined Network, SDN)的小型蜂巢(Small Cell)運行的環境中提供多功能和靈活運用的基礎設施。由於蜂巢的大小由基地臺(Base Station, BS)協調的無線資源決定；因此小型蜂巢的概念發想且植基於動態分配的無線資源和軟體定義網路架構。5G無線通訊的基地臺(eNB)配備智慧型天線設施，例如：支持MIMO

技術的天線陣列或可重構天線場型。此類天線技術可實現更高效能以及準確的到達方向（Direction of Arrival, DoA）和到達時間（Time of Arrival, ToA）估計。這些技術幫助設備傾向於進行視距傳輸，從而達成準確的設備定位。5G 無線通訊網路包括毫米波（mmWaves）在內的更高頻段上運行。這些頻段在過去多半只適用於短距離通訊。因此，此類高頻段與高度密集的網路整合在一起，通過各種頻率複用策略提供高總體傳輸容量。然而，利用毫米波實現高密度網路帶來了其他傳輸問題；例如：5G 無線通訊內接收機中的類比訊號處理、類比切換波束技術和波束搜索過程變得極其複雜，且深具挑戰性。這些問題同時也使得 5G 無線通訊網路的基地臺較為昂貴，卻也必須布建得比 4G 行動通訊網路來得密集；這也是 5G 無線通訊網路現今營運商轉的困境。

先前的 3G 與 4G 世代許多頻段使用上已經飽和，依據 3GPP 定義的規格，5G 分為 2 個大頻段，以 6 GHz 頻段為界線，6 GHz 以下，也就是 Sub-6G，範圍在 450 MHz 至 6 GHz 之間，而「毫米波」，也就是 mmWave 頻段，則是屬於高頻段，範圍在 24 GHz 至 52 GHz 之間。mmWave 是近期技術突破後才開始採用的全新範圍，臺灣初期應用面仍是以 Sub-6G 為大宗。然而，Sub-6G 並非沒有缺點，如前面所提到的，Sub-6G 所涵蓋的頻段多數已被占用，因此使用的資源變得相當有限，也有不少國家捨棄飽和的 Sub-6，完全轉向毫米波發展 5G 頻段。不過就算如此，因為毫米波技術不確定性太高，所以在頻寬足夠的情況下，Sub-6 頻段仍然是電信業者的首要選擇。（Zero 圈圈，2020）

毫米波技術隨高頻段特性而來的技術缺陷還有待克服，包括高頻路徑損失（Path Loss）、傳輸耗損（Propagation Loss）、穿牆性（Wall Penetration）等。高頻毫米波在物理上的特性與 6 GHz 以下無線電波不同，毫米波的功能技術特性包括：高頻寬（Broad Bandwidth）、大且連續的頻段（Uncluttered Spectrum）、高訊號分辨率（High Resolution）、天線尺寸小（Small Antenna Size）、高整合度的 SoC（Compact Integrated mmWave SoC）、大規模 MIMO／波束成形（Massive MIMO/Beamforming）、高指向性（High Directivity）、大氣特性（Advantageous Use of Atmospheric Properties）等。這些特性部分有助於提供高頻寬與 5G 更好的使用經驗，有些則帶來許多技術瓶頸與挑戰，例如高頻路徑損失、毫米波應用經驗少且特性掌握度低、容易折射與散射（Reflection and Diffusion）、身體遮蔽與握持阻斷訊號、更小更脆弱的電纜／轉接器和配件、成本高、毫米波天線與前端整合、毫米波波束成形校準（mmWave Calibration for Beamforming）等等（廖專崇，2018）。

貳、同步網路

美國國家標準協會（American National Standards Institute, ANSI）同步標準建議 T1.101 中提供了每個層級的同步性能和時脈精度的詳細資訊。Telcordia 和 ANSI 文檔 GR-253-CORE、GR-499-CORE 和 T1.105 標準以及歐洲電信標準協會（European Telecommunications Standards Institute, ETSI）標準 G.707、G.783、G.784 和 G.803 聲明 SONET/SDH 為標準化協議，可同步傳輸多個數位串流；SONET 和 SDH 旨在支持來自協議內的各種不同類型的源／源的即時操作。根據國際電信聯盟—電信標準部（International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector, ITU-T）G.709 建議書，與 SONET/SDH 稍有不同，光傳輸網路（Optical

Transport Network, OTN) 使用波長分工複用 (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 的光網路提供同步。

隨著新網路和通訊技術的發展，同步要求正在迅速變化。近來，行動通訊應用已成為同步技術進步的主要驅動力。5G 網路可以通過歐洲的全球導航衛星系統 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 或美洲的全球定位系統 (Global Positioning System, GPS) 提供的主時脈準位來實現時間精度。時間、頻率和相位同步都是必需的，並且對於 5G 網路至關重要。衛星導航所提供的時脈訊號精度可以達到 15 分鐘正負 10 毫微秒 (ns) 或 3 小時正負 100 毫微秒。這意味著頻率誤差的時間平均值為十億分之 0.01 (ppb)。除了穩定的局部振盪器之外，衛星之間的切換也是一個重要問題。

如表 1 所示，0.01 ppb 是第一層所需的頻率精度，例如：攜帶有銫 (Cs) 或銣 (Ru) 振盪器的芯片級原子鐘 (Chip-Scale Atomic Clock, CSAC)。從使用原子鐘標準的最高頻率精度開始，定義為第一層級的時脈，自由運行精度為 0.01 ppb。頻率精度在固定於建築物的定時電源 (BITS) 中以 ±0.016 ppm 的自由運行精度傳輸到第二層時鐘。BITS 同時提供所有網路元件，在這些網路元素中配備了具有 ±4.6 ppm 的自由運行精度的第三層級的局部時脈。當時序路徑中的所有時鐘同步時，網路中的所有局部時鐘將具有近似於第一層時鐘的頻率精度；這稱為第一層精度可回溯性。現行的行動通訊網路仰賴使用專用微波同步鏈路和同步供應單元 (Synchronization Supply Unit, SSU) 在網路中實現的主參考時脈 (PRC) 的使用。PRC 主要符合國際標準 ETSI-EG-201-793，而同步供應單元用於在衛星間保持操作的幫助能去除高頻相位雜訊。

表 1 階層時脈精度要求

層級	自由運行 精度	精確性調教 範圍	24 小時換手精度 容忍範圍	訊框滑失 時間	時鐘類型
1	1.0E-11	1.0E-11	N/A	72 days	銫原子鐘或 GPS
2	1.6E-8	1.6E-8	1E-10	7 days	銣原子鐘
3E	4.6E-6	1.0E-6	1E-8	3.5 hours	精確石英鐘
3	4.6E-6	1.0E-6	3.7E-7	6 minutes	建物間傳輸
4	32E-6	32E-6	N/A	N/A	用戶元件

資料來源：J.-C. Lin (2018)。

參、行動通訊之同步系統

同步是行動通訊技術的關鍵，也是傳輸實體層的核心。行動通訊應用相關的同步要求與 ITU-T 最近的工作有極高的關聯性。因此，重要的行動通訊應用和相關同步要求表列於 ITU-T 建議 G.8261 (International Telecommunication Union [ITU], 2013) 和 G.8271 (ITU, 2016) 中。行動網路中始終需要頻率同步，通常是為了允許用戶設備 (User Equipment, UE) 在蜂

巢之間進行切換。事實上，當從一個蜂巢移動到另一個蜂巢時，用戶設備必須能夠將其時脈與頻率鎖定在相異的基地臺所提供的時序參考中。行動設備中定時回復，例如：在引入範圍方面，對基站產生的信號可以容忍的頻率誤差提出了一些要求。由於移動性，還必須為潛在的都普勒效應（Doppler Effect）保留一些誤差範圍，這在高移動性環境中變得尤其重要。因此，為了確定用戶設備和連接網路之間的總頻率誤差的限制，有必要確認通過無線電接口產生的頻率差的最大容限。

2G 行動通訊 GSM 是以行動通訊技術轉而推動特定同步要求之標準的第一個例子。ETSI TS 145 010 (3GPP, 2016) 提供了應用於 GSM 網路的頻率同步要求。ETSI TS 145 010 中規定，基地臺應使用絕對精度優於 0.05 ppm 的單一頻率源來生成射頻和基頻時脈；所有基地臺的載波應來自相同的同步訊源；並且，小型基地臺的絕對精度要求放寬到 0.1 ppm。0.05 ppm 的同步要求不僅已成為行動通訊技術驅動同步要求的里程碑，而且還是近年同步研究背後的主要驅動力。

類似的頻率同步要求也適用於其他第三代行動通訊技術。例如，在 UMTS，頻率同步的要求定義於在 3GPP TS 25.104 (3GPP, 2001) 中，針對 FDD 和 3GPP TS 25.105 (3GPP, 2002) 中針對 TDD 進行了規定。頻率誤差，即實際基地臺發射頻率與指定頻率之間的誤差，在廣域網路時，基地臺的調變載波頻率應精確到 ± 0.05 ppm 範圍內；區域網路的基地臺調變載波頻率應精確到 ± 0.10 ppm 範圍內。對於較小的蜂巢，要求較為寬鬆；主要原因之一是因為較小蜂巢中，使用者的移動性較低，因此為較低的都普勒效應保留了較少的餘量。另一個原因是由於更高的蜂巢密度，更小的蜂巢需要更便宜的基地臺。除了頻率同步要求外，UMTS 標準的 TDD 模式還要求基站相位同步。在無線接取點上正確生成 TDD 訊框需要相位同步，以避免上、下行傳輸訊號之間的干擾。TDD 採用具有相同頻帶，但不同時槽的 CDMA 訊號，在時間基礎上分割為上行鏈路和下行鏈路傳輸。為了實現時槽同步，在 TS 25.123 中定義基地臺間同步 (3GPP, 2011c)。在具有重疊覆蓋區域的相同頻率上的任何基地臺間，訊框開始時間的最大偏差為 3 微秒。參考時脈訊號的規範，訂於 3GPP TS 25.402 (3GPP, 2011c)。

CDMA 行動通訊技術是第一個新增時間同步要求的技術。CDMA2000 中也定義了類似的要求。根據相關規範 3GPP2 C.S0010-B (3GPP2, 2004b) 和 3GPP2 C.S0002-C (3GPP2, 2000a)，基地臺恢復 CDMA 系統時間為 ± 3 μ s 的精確度。此後，對於 LTE 中的 TDD，在 3GPP (2011a) 中規定，對於半徑小於 10 公尺的蜂巢，具有重疊覆蓋區域的同一頻率上的任何一對蜂巢之間的訊框起始時間的最大絕對偏差應低於 3 μ s。對於半徑大於 3 公里的蜂巢，訊框起始時間的最大絕對偏差應低於 10 μ s。

4G 行動通訊具有新應用和架構的 LTE-A 通訊系統在接近 2.0 或 3.8 GHz 頻率的頻譜上運行。LTE 的 TDD 比 FDD 模型有更高的同步要求。LTE-TDD 的 BS 需要具有 50 ppb 的頻率精度 (3GPP, 2011b) 和 ± 1.5 μ s 相位差的時間精確度。對於半徑為 3 km 區域內的小蜂巢，基地臺的振盪器需要在 4 到 18 小時保持時間內保持 ± 1.5 μ s 的相位精度以支持協調，例如：增強干擾協調 (Enhanced Inter-cell Interference Coordination, eICIC) 和上行／下行協調調度。小型電池通常配備低成本晶體振盪器，以在幾分鐘內保持 ± 1.5 μ s 的相位精確度。LTE-A 是第一個根據應用在不同的使用者設備上設置特定同步要求的例子。時間對齊誤差 (Time

Alignment Error, TAE) 定義為不同發射天線連接器上任意兩次傳輸之間的平均訊符定時差。對於具有多個發射天線連接器的使用者設備，TAE 要求不超過 130 ns。

5G 行動通訊承續 4G 正交分頻多工 (Orthogonal Frequency Division Multiplex, OFDM) 依低頻到高频不同頻段特性，5G 在 OFDM 訊號下，每個頻寬會有非常多個子載波，為了便於管理會將每 12 個連續子載波合稱為一個資源塊 (Resource Block, RB)，此方式與 4G LTE 相同，基地臺給每位使用者的頻率資源是以 RB 為最小單位，例如使用者 A 資料量很少，基地臺便可能分配 1 個 RB 給此使用者。使用者 B 資料量非常多，基地臺便可能分配 100 個 RB 給此使用者。5G 的 RB 數量與子載波間距及總頻寬均有關係，例如子載波間距為 30 kHz 情況下，若總頻寬為 50 MHz，最大 RB 數為 133。若總頻寬為 100 MHz，最大 RB 數則增為 273，代表在最大極限下，某使用者可能獲得 273 個 RB 配置而達到最快的傳輸速度。如果在尖峰時間基地臺有很多人使用，則此 273 個 RB 必須分配給全部的使用者，每位使用者得到 RB 數減少，使用者的平均傳輸速度就會降低。

肆、安全議題

由以上的無線通訊發展史，我們可以很容易窺知傳輸實體層技術為無線通訊演進的根基；而同步網路中的時脈訊號，已然成為連接無線通訊網路的「神經系統」。自從 3G 行動通訊前期，西元 2000 年以前，歐規系統即使用衛星定位系統所傳送下鍊時脈訊號為廣域網路提供第一層級穩定的時脈。時至二十多年後的今日，4G、5G 無線通訊系統早已習以為常地依賴衛星定位系統所提供大區域範圍的同步時脈訊號。在區域不穩定的現實情況中，衛星定位系統的訊號極有可能因為政治因素、軍事行動而遭阻斷。若此阻斷萬一發生，無線通訊網路極有可能全面停擺。此時提供次級同步時脈網路必須立即接手網路同步的工作。精密時間協定 (Precision Time Protocol, PTP) IEEE 1588 則是此項工作現行最佳的備援選擇 (“Precision Time Protocol,” 2021)。IEEE 1588 採用一個客戶機／伺服器架構來保持所有網路元件的精確同步。對於在其網域內的所有 PTP 客戶機來說，該伺服器 (PTP 母鐘, PTP Grandmaster Clock) 是主基準源，它不斷發出同步、跟隨和延遲回應資訊到它的所有客戶機中；利用封包網路架構，客戶機連續不斷地發送延遲請求資訊到伺服器來保持同步。使用時間標識封包，客戶機可確定頻率並計算正確時間，而該時間可追溯到母鐘的主基準。IEEE 1588 對於民生用途的 5G 無線網路十分重要。對於獨立運作的軍方專網而言，IEEE 1588 也提供了獨立於商業用途網路之外的穩定同步時脈訊源 (Pragasam and Round, 2014)。

伍、結語

時間同步是包括金融、電信、工業、消費類以及航空航天與國防在內大多數產業的普遍要求。所有市場都有眾多應用仰賴時間同步。各個基站要交互信息，需要步調一致，準確知道對方目前的狀態，預知下一個時刻將要發生的動作，才能配合默契。以 5G 為例，在 TDD 模式下，時間是用來區分上下行的，基站間需要嚴格步調一致。如果相鄰基站沒有採用相同

的時間基準，一個正在進行下行發射，另一個卻在進行上行接收，發射基地的信號會進入接收基地，從而產生強烈干擾，系統完全無法運轉，因此，「同步」是所有無線網路正常工作的基礎。

本文回顧了 1G 到 5G 無線通訊技術發展；並以規範與標準為時序，探討傳輸實體層的實現和各種新服務所需的同步要求。一旦衛星定位系統的訊號遭阻斷，高度仰賴同步網路的無線通訊網路則暴露於全面崩潰的風險中。無論是對於民生用途的第五代無線網路或是軍方專網而言，以 IEEE 1588 建置備援同步時脈網路均為刻不容緩的安全議題。

參考文獻

- 〈GMSK〉，2015 年 6 月 18 日，《MBA 智庫百科》，<https://wiki.mbalib.com/zh-tw/GMSK>（瀏覽日期：2022 年 1 月 13 日）。
- 〈GSM〉，2021 年 2 月 6 日，《維基百科》，<https://zh.wikipedia.org/wiki/GSM>（瀏覽日期：2021 年 5 月 12 日）。
- Pragasam R., and Round R., 2014 年 7 月 14 日，〈IEEE/ITU 標準助力 LTE 網路克服定時／同步挑戰〉，《新通訊》，<https://www.2cm.com.tw/2cm/zh-tw/archives/EB8BBD19F5AE4A22AEC0D19239C5CEFA>（瀏覽日期：2021 年 1 月 13 日）。
- Zero 圈圈，2020 年 3 月 2 日，〈什麼是 5G？5G 頻段 Sub-6、mmWAVE 毫米波差異與優勢介紹〉，《Cool3C》，<https://www.cool3c.com/article/152100>（瀏覽日期：2022 年 1 月 13 日）。
- 〈分時多工〉，2018 年 4 月 15 日，《維基百科》，<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%97%B6%E5%88%86%E5%A4%9A%E5%9D%80>（瀏覽日期：2022 年 1 月 13 日）。
- 廖專崇，2018 年 1 月 29 日，〈毫米波挑戰／商機並陳 5G 高頻高速發展向前衝〉，《新通訊》，<https://www.2cm.com.tw/2cm/zh-tw/market/CC9297EB552A4A7198273D6D143E373F>（瀏覽日期：2022 年 1 月 13 日）。
- 〈類比式行動電話系統〉，2019 年 5 月 12 日，《維基百科》，<https://zh.wikipedia.org/wiki/類比式行動電話系統>（瀏覽日期：2021 年 5 月 12 日）。
- 3GPP, 2001/9, “3G UTRA—Frequency Division Duplex (FDD) Mode-Base Station Radio Transmission and Reception,” *TS 25.104*, <https://www.tech-invite.com/3m25/tinv-3gpp-25-104.html> (accessed December 11, 2021).
- 3GPP, 2002/10, “3G UTRA—Time Division Duplex (TDD) Mode-Base Station Radio Transmission and Reception,” *TS 25.105*, <https://www.tech-invite.com/3m25/tinv-3gpp-25-105.html> (accessed December 7, 2021).
- 3GPP, 2011a/10, “E-UTRA—Requirements for Support of Radio Resource Management,” *TS 36.133*, <https://www.tech-invite.com/3m36/tinv-3gpp-36-133.html> (accessed November 14, 2021).
- 3GPP, 2011b/4, “E-UTRA—TDD Home eNode B (HeNB) Radio Frequency (RF) Requirements Analysis,” *TR 36.922*, <https://www.tech-invite.com/3m36/tinv-3gpp-36-922.html> (accessed

December 16, 2021).

- 3GPP, 2011c/4, “UTRA—Requirements for Support of Radio Resource Management (TDD),” *TS 25.123*, <https://www.tech-invite.com/3m25/tinv-3gpp-25-123.html> (accessed November 9, 2021).
- 3GPP, 2016/11, “Radio Subsystem Synchronization,” *ETSI TS 145 010*, https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/145000_145099/145010/13.03.00_60/ts_145010v130300p.pdf (accessed November 25, 2021).
- 3GPP2, 2004a/7, “Physical Layer Standard for CDMA2000 Spread Spectrum Systems,” *C.S0002-C*, https://www.3gpp2.org/Public_html/Specs/C.S0002-C_v2.0_040729.pdf (accessed November 18, 2021).
- 3GPP2, 2004b/2, “Recommended Minimum Performance Standards for CDMA2000 Spread Spectrum Base Stations,” *C.S0010-B*, https://www.3gpp2.org/Public_html/Specs/C.S0010-B_v2.0_021704.pdf (accessed December 7, 2021).
- Castoldi P., 2002, *Multiuser Detection in CDMA Mobile Terminals*, Boston, MA: Artech House.
- Gardner F. M., 1984, “Phaselock Technique,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 14(1), 170-171. doi:10.1109/TSMC.1984.6313286
- Haykin S. S., 2002, *Adaptive Filter Theory*, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- International Telecommunication Union, 2013, “Timing and Synchronization Aspects in Packet Networks,” *ITU-T Recommendation G.8261*, <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.8261> (accessed December 7, 2021).
- International Telecommunication Union, 2016, “Time and Phase Synchronization Aspects in Packet Networks,” *ITU-T Recommendation G.8271*, <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.8271/en> (accessed December 11, 2021).
- Lin J.-C., 2002a, “Differentially Coherent PN Code Acquisition with Full-Period Correlation in Chip-Synchronous DS/SS Receivers,” *IEEE Transactions on Communications*, 50(5), 698-702. doi:10.1109/TCOMM.2002.1006549
- Lin J.-C., 2002b, “Noncoherent Sequential PN Code Acquisition Using Sliding Correlation for Chip-Asynchronous Direct-Sequence Spread-Spectrum Communications,” *IEEE Transactions on Communications*, 50(4), 664-676. doi:10.1109/26.996081
- Lin J.-C., 2018, “Synchronization Requirements for 5G: An Overview of Standards and Specifications for Cellular Networks,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 13(3), 91-99. doi:10.1109/MVT.2018.2813339
- Lin J.-C., Sun Y.-T., and Poor H. V., 2016, “Initial Synchronization Exploiting Inherent Diversity for the LTE Sector Search Process,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 15(2), 1114-1128. doi:10.1109/TWC.2015.2485262
- Lin S., and Costello D. J., 2005, *Error Control Coding: Fundamentals and Applications*, Engle-

wood Cliffs, NJ: Pearson Prentice Hall.

Mengali U., and D'Andrea A. N., 1997, *Synchronization Techniques for Digital Receivers*, Boston, MA: Springer. doi:10.1007/978-1-4899-1807-9

“Multipath Propagation,” 2021/10/12, *Wikipedia*, https://en.wikipedia.org/wiki/Multipath_propagation (accessed January 13, 2022).

“Precision Time Protocol,” 2021/1/21, *Wikipedia*, https://en.wikipedia.org/wiki/Precision_Time_Protocol (accessed May 12, 2021).

“Test-Driven Development,” 2022/1/9, *Wikipedia*, https://en.wikipedia.org/wiki/Test-driven_development (accessed January 13, 2022).

Tsai Y., Zhang G., Grieco D., and Ozluturk F., 2007, “Cell Search in 3GPP Long Term Evolution Systems,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2(2), 23-29. doi:10.1109/MVT.2007.912929

Wang Y.-P. E., and Ottosson T., 2000, “Cell Search in W-CDMA,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 18(8), 1470-1482. doi:10.1109/49.864011

Widrow B., and Stearns S. D., 1985, *Adaptive Signal Processing*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.

Yuan G., Zhang X., Wang W., and Yang Y., 2010, “Carrier Aggregation for LTE-Advanced Mobile Communication Systems,” *IEEE Communications Magazine*, 48(2), 88-93. doi:10.1109/MCOM.2010.5402669

Ziemer R. E., and Tranter W. H., 2014, *Principles of Communications: Systems, Modulation, and Noise*, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.