

連結型コンテナを単位とした IEEE802 形式フレームの構成

松田 泰至

概要

ここ数年の無線技術、特に IEEE802.11 形式のいわゆる無線 LAN 技術の発展には目を見張るものがある。高速ローミング技術、QoS 技術、同時接続数の増加、セキュリティ技術等その進化は多岐にわたるがとりわけ情報伝送速度は複数の要素技術の相乗的な効果により劇的に向上している。その値は理論値とはいえ数年前の 900Mbps から現在は 9.6Gbps となり、次規格である IEEE802.11be では 46Gbps となる予定である。その結果、従来はその利便性により、多数のクライアント端末の収容を主な役割として使用されてきた無線技術は、有線技術と肩を並べネットワークの主幹部分を構築する技術として成長してきた。

本稿では、階層型ネットワークの主幹部分に無線技術を効果的に使用するために、代表的な有線技術である DIX 型イーサネットと IEEE802.11 無線技術間を結ぶ上位層のプロトコルの提案を行う。本稿で提案する手法を用いることにより、アクセス機器とディストリビューション機器間のフレーム転送効率の向上が可能となる。また、本稿で提案する手法が IEEE802.11 無線技術間にも適用可能であることも併せて示す。

1 はじめに

1.1 主幹ネットワーク構築技術要素としての無線技術

Cisco Systems 社提唱による 3 階層に基づくネットワークアーキテクチャは、ネットワーク設計法の一つとして広く知られている/citeCISCO。このモデルではネットワークをその役割に応じて、ユーザ側から見て順に、1. アクセス (Access) 層、2. ディストリビューション (Distribution) 層、3. コア (Core) 層に分割している。アクセス層の主な目的は、多数のユーザをネットワークに接続可能とするための資源提供である。この層では、固定化された PC 等に対しては L2 スイッチによる有線による接続を、また移動端末等に対しては天井等に配置したアクセスポイント (Access Point) を経由した無線 LAN による接続を、それぞれ提供している。そして、アクセス層で収容された各種パケット (ここではユーザデータや制御信号等を示す一連のビットの集合体をパケットと称している) は上位層であるディストリビューション層、さらにはディストリビューション層機器間での送受信のため最上位のコア層へと至る。従って、一般に上位層になるほどトラフィック量は増大するため、広帯域を持つ経路や大量のパケットの交換処理を可能とする高性能機器の設置を必要とする。

従来、広帯域かつ高品質の通信経路としては有線が用いられてきた。特に、光ファイバーの使用は堅牢な物理層を築くための要素技術としては他に比肩するものはない。しかし、工事費用に加え媒体を利用するために必要となる SFP (Small Form-factor Pluggable) トランシーバ等も使用帯域によっては高価となるため、ディストリビューション層以降、全ての通信経路を光ファイバーのみにより構築することは現実的ではない。そこで一般には、代替策としてメタルケーブルが使用されるが、媒体自身に許容される帯域が限られている。一例として挙げれば、CAT.5e ケーブルならば 2.5Gbps まで、CAT.6 ケーブルでも 5Gbps, 10Gbps を要する場合は CAT.6A あるいは CAT.7 ケーブルが必要となる。またこれらのケーブルに対してアグリゲーション (aggregation) 技術を使用することによりある程度の広帯域通信路を設定できるがそれにも限りがある。さらに光ファイバーであろうとメタルケーブルであろうと有線である限り、配線後は機器の移動を含めてネット

ワーク構成の変更に対する自由度は極めて低くなる。

一方、無線技術の場合、有線の場合のような伝送媒体自身による帯域制限はほとんどない。さらに、その性質上、ネットワーク構成機器の配置に対する自由度は高く、状況に応じて機器の移動・追加等、自由にネットワークの再構成が可能となる。従って、無線技術により有線に匹敵する、あるいはそれを超える広帯域な通信方式を確立できれば、将来はアクセス層以降の通信経路においても無線技術の利用は十分に検討に値するものとなる。近年の無線技術、特に IEEE802.11 方式無線 LAN 技術、の機能発展には目を見張るものがある。伝送速度だけを比較してみても最大値は、開発当初 2Mbps であった IEEE802.11 規格は、802.11b の 11Mbps を皮切りに、802.11a および g の 54Mbps、802.11n の 900Mbps を経て、現在は 802.11ax の 9.6Gbps となり、次規格である 802.11be では 46Gbps となる予定である [2]。もとより、これらの数値は理論的な最適値であるが、使用帯域帯の増加（チャンネルボンディング）、変調方式の高密度化、MIMO による空間分割数の増加等の各技術要素の相乗効果を考慮すれば今後も更なる飛躍が十分に考えられる。

1.2 本稿で対象とするシステムについて

1.1 における考察を踏まえて、本稿では以下に示す条件を満たすシステムを考える（図 1）。

1. ユーザ等の端末とアクセス層の機器（L2 スイッチ。以降、本稿では単にアクセススイッチと称するものとする）間およびコア層の機器とディストリビューション層の機器（L2 あるいは L3 スイッチ）間は、共に DIX 型イーサネット（以降、単にイーサネットと称するものとし、IEEE802.3 型イーサネットと区別する。）により接続されている。
2. 単一のディストリビューション層の機器に対して複数のアクセス層の機器が IEEE802.11 形式の無線技術により接続されている。本稿では具体例として IEEE802.11ac を想定するが、基本的な考え方は他の IEEE802.11 技術においても同様に成立する。
3. 上記無線技術の無線フレームペイロードにイーサネットフレーム自身（複数可）を格納する。

本来 L2 技術の一つである無線 LAN のフレームには、例えば IP パケットのような上位層のデータがペイロードに格納・送信される。そして宛先において適宜必要とされる新たな L2 技術のフレームに上位層データは移される。しかし、当システムのように送信元および宛先において DIX 型イーサネットの使用を前提とし

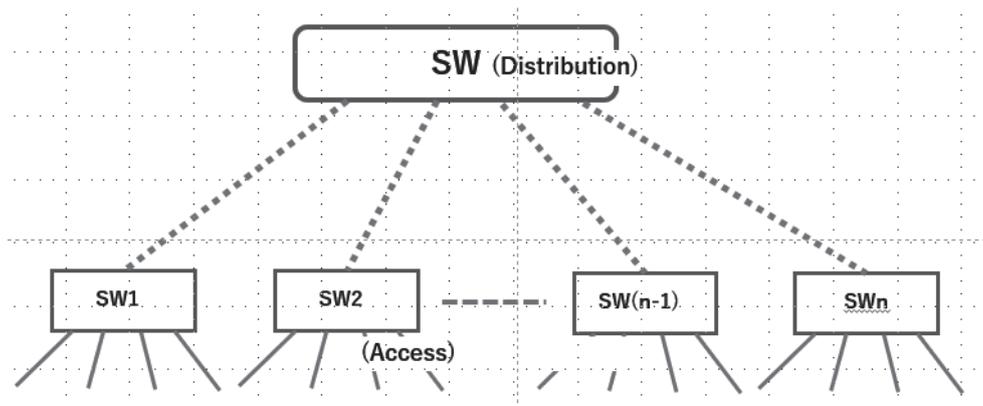


図 1 ネットワーク概念図

ている場合には、アクセススイッチで上位層データを取り出し無線フレームに移し、宛先において再度イーサネットフレームに再構成するのは、オーバーヘッド削減に伴う無線フレームの転送効率の若干の向上が見込めたとしても、システム全体の効率を考えると無駄な処理を科しているにすぎない。条件3はこのような非効率な処理を排除するためのものである。

また当システムは、現実的には事務室やコンピュータ演習室等において「島ハブ」と呼ばれるクライアント端末を接続する LAN スイッチ (アクセススイッチ) にのみ原則無線機能を搭載し、天井等に AP 兼務のディストリビューション層機器を設置したネットワーク構成により実現できる。このようにディストリビューション層機器に直接無線 LAN 経由で接続可能な機器をアクセススイッチに制限することにより、次のような利点が得られる。

1. 各無線子機に割当てられる帯域の減少を抑えることができる。
2. 無線機器を固定することによりアンテナ等の設置を最適化でき得る。
3. アクセススイッチおよびディストリビューション層機器にのみ、モジュール等の形態により最新の無線 LAN 技術を実装することにより、互換性保持による無線 LAN 機能のダウングレードを避けることができる。

当システムは、複数の PC 等のクライアント端末をアクセススイッチで束ねることにより、無線 LAN のフレーム送信数を相対的に減少させている。従って、システム全体の遅延を抑えるためには、無線 LAN フレームのペイロードに効率よく複数のイーサネットフレーム自身を格納する必要がある。この場合、イーサネットフレーム自身が無線 LAN フレームの上位層データとして取り扱われる。特に IEEE802.11 形式の無線 LAN が CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 方式を採用しフレーム毎に AP からの ACK フレームの確認を要することより、無線 LAN フレームのオーバーヘッドを考慮すると伝送効率の点からは、フレーム長の短いイーサネットフレーム程まとめて送信することが望ましい。また、近年のコロナ禍を契機にその利用が急速に広まったりリモート会議では、その使用パケットサイズの多くが 100 数十バイトとの報告や、より詳細な分析では、VIDEO 情報を除き、制御・データ・音声等のパケットサイズは主に 200 バイト以下との報告もあり [3]、以上のことより、当システムではフレーム長の短いイーサネットフレーム、具体的には 255 バイト以下のフレームを対象とする。

また、無線フレームの送信数を抑える一つの方策に IEEE802.11n/ac 等で採用されているフレーム集約の技術がある [4]。この技術により一つのプリアンブルおよび PLCP ヘッダを共有し、複数の MAC(Media Access Control) フレームをまとめて送信することが可能となる。従って、システム全体の処理遅延を可能な限り抑えるように、当システムの条件3を満たすべく無線 LAN の MAC フレームを構成すれば、この集約技術により大量のイーサネットフレームが搬送できることになる。次章では、当該 MAC フレームの構成法について述べる。なお、先述の通り、具体的な数値を示すため本稿では無線 LAN 技術として IEEE802.11ac を使用する。

2 IEEE802 形式フレームにおける上位層プロトコルの指定方法

本章では、先述の条件3を満たす無線 LAN MAC フレームを2種類提案する。まず両タイプに共通する準備事項として、(1) 無線 MAC フレームおよび (2) 無線 MAC フレームの FCS, について述べる。

2.1 準備

当システムでは無線フレームの送信元はアクセススイッチ、宛先はディストリビューション層機器となることより、IEEE802.11ac の MAC フレーム内の各アドレスは

- Address1 : 無線 LAN で使用している BSSID
- Address2 : アクセススイッチの MAC アドレス
- Address3 : ディストリビューション層機器の MAC アドレス
- Address4 : なし

となり、常に一定となる。従って、MAC ヘッダ部計 30 バイト (Address4 が無いものとする) のなかで最大 12 バイトの値が無線フレーム毎に可変となる可能性がある。

次にペイロード部を考察する。周知のように、IEEE802.11 形式の MAC フレームには、イーサネットフレームのような上位層プロトコルを示すフィールドは用意されていない。そのため、ペイロード開始部に LLC(Logical link control) ヘッダおよび SNAP(SubNetwork Access Protocol) ヘッダを配置し、その部分で上位層プロトコルを指定している。SNAP を使用する場合、LLC を構成する各フィールドは常に、先頭より、

- DSAP (Destination Service Access Point) : 0x10101010(AA)
- SSAP (Source Service Access Point) : 0x10101010(AA)
- Control : 0x00000011(03)

と固定となり、さらにそれに続く SNAP の各フィールド OUI および PID も

- OUI(Organizationally Unique Identifier) : 0x000000(000)

が固定であるため、結局、イーサネットのタイプフィールド同様、PID(Protocol ID) の 2 バイトにより上位層プロトコルを指定することとなる。このイーサネットのタイプは、” IEEE802 Numbers ” として IEEE により登録管理されているが [5]、2022 年 2 月 22 日現在、B7EA~FEFF までが利用可能である。そこで、当システムでは、PID の最初の 2 ビットのみを 1 とすることにより C 以上を確保し従来の PID との重複を避けることとし、残りの 14 ビットを使用するものとする [図 2]。

次に、FCS(Frame Check Sequence) について考察する。イーサネットフレームおよび無線フレーム共に、フレーム内に生じた誤りを検出するために 32 ビットよりなるビット系列をフレームに付加している。両フレーム共に、CRC-32 (Cyclic Redundancy Check-32) と呼ばれる線形符号を用いており、その生成多項式 $G(X)$ は次式により与えられる [6]。

$$G(X) = X^{32} + X^{26} + X^{23} + X^{22} + X^{16} + X^{12} + X^{11} + X^{10} + X^8 + X^7 + X^5 + X^4 + X^2 + X + 1 \quad (1)$$

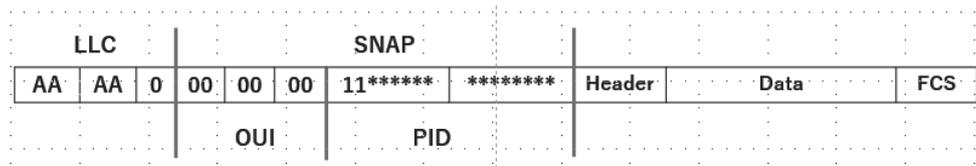


図 2 上位層プロトコルの指定

いまイーサネットフレームを FCS 部以外の部分と FCS 部の連結とみなした上、FCS 部を低次側とした $GF(2)$ 上の不定元 X の多項式として、それぞれを $F(X), D(X)$ および $R(X)$ とすると、次式が成立する。

$$F(X) = D(X) + R(X) \tag{2}$$

$$R(X) \equiv D(X) \pmod{G(X)} \tag{3}$$

従って、式 (3) より、

$$\begin{aligned} F(X) \pmod{G(X)} &= (D(X) + R(X)) \pmod{G(X)} \\ &= D(X) \pmod{G(X)} + R(X) \pmod{G(X)} \\ &= R(X) + R(X) \\ &= 0 \end{aligned} \tag{4}$$

となる。式 (4) は、無線 MAC フレームペイロードに格納される任意のイーサネットフレームは無線 MAC フレームの FCS の計算には全く影響を与えないことを意味している。

2.2 前置集約型 (type 0)

まず無線フレームペイロードの上位層プロトコルを指定する無線 MAC フレームペイロード部に格納されている複数のイーサネットフレームをディストリビューション層機器側において取り出すには、フレームの個数および各フレームの長さが必要となる (ペイロード長に対する制約を満たすために Padding を必要とする場合は最終イーサフレーム後に挿入するものとする)。IEEE802.3 形式のフレームと異なりイーサネットフレームには陽にフレーム長を示すフィールドはなく、96 ビット時以上の IFG (Inter Frame Gap) を設けることによりフレームの区切りを示している。また現在の L2 スイッチは Store and Forwarding 方式を採用しているため、イーサネットフレーム受信時にその長さを確定し、FCS 計算の結果誤りの検出されたフレームはその段階で廃棄処分とする。そこで、当システムでは、無線 MAC フレームへのイーサフレーム格納後の処理に要する時間、伝送機会を得るまでの時間、伝送時間等の諸条件により決まる許容時間内にアクセススイッチに到達した誤り未検出のイーサネットフレームを無線 MAC フレームに順次格納し、その先頭部に制御情報として、全て 1 バイト単位で、フレーム数 M に続いて、各フレーム長 $Lf_i (i = 1, 2, \dots, M - 1, M)$ を記述する [図 3]。

このとき、各イーサネットフレームを $GF(2)$ 上の不定元 X の多項式 $f_i(X) (i = 1, 2, \dots, M - 1, M)$ 、また padding 長を L_p とすると、

$$\deg F_M(X) = 32 + L_p + \sum_{i=1}^M Lf_i \tag{5}$$

が成立する。従って、無線 MAC フレームペイロードの上位層プロトコル指定のための LLC および SNAP 部、および先述の制御情報部を $\deg F_M(X)$ 次を基点とした $GF(2)$ 上の不定元 X の多項式として、それぞれ、

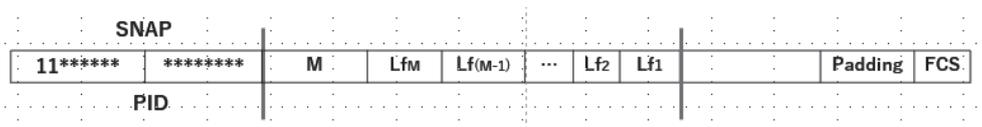


図 3 type0 フレームフォーマット

$U_0(X)$ および $C_0(X)$ とすると、式 (4) により、結局、無線 MAC フレームの FCS の対象は

$$(U_0(X) \cdot X^{8(M+1)} + C_0(X)) \cdot X^{\deg F_M(X)} \quad (6)$$

のみとなる。

FCS を高速に計算するためには、事前計算と並列処理が効果的である。式 (6) より FCS 計算の対象となる多項式の項数は約 2400 程度となり、無線 MAC フレームペイロード部の最大項数約 96000 と比べると大幅に減少しているが、その計算の主たる部分は

$$X^{\deg F_M(X)} \pmod{G(X)} \quad (7)$$

が占めている。そこで、この部分の計算も含めて、更なる処理時間の短縮を目的にしたタイプとして、連結コンテナ型 (type1) を次に提案する。

2.3 連結コンテナ型 (type1)

前節で提案した前置集約型 (type 0) では、padding 部を除き、無線 MAC フレームのペイロードには、イーサフレーム本体およびその制御情報のみという必要最小限の構成となっているその利用効率は最大となっている。一方、FCS の計算については格納対象となるすべてのイーサネットフレームが確定した後でなければ開始することができない。本節で提案する方法は、無線 MAC ペイロードの利用効率をある程度下げながらも格納するイーサネットフレームの確定後、速やかに FCS の計算も終わることを可能とするものであり、無線フレーム構成に要する時間の短縮が、無線フレーム伝送時間の増加以上の効果をもたらす場合に有効と考えらえる。

まず本節で提案する型 (以下、単に type1 と称するものとする) における無線 MAC フレームペイロードの上位層プロトコルの指定方法を示す。type1 では、ペイロードに直接イーサネットフレームを格納するのではなく、あらかじめペイロードを固定幅の領域 (以下、この領域をコンテナと呼ぶものとする) に分割しておき、各コンテナ毎にイーサネットフレームを格納する。この格納されるイーサネットフレーム数 M およびコンテナ長 L_c を、それぞれ SNAP の最後の 2 バイトで示すこととする。すなわち、 M は最初の 2 ビット 0x11 を除く 6 ビットで、また L_c は最後の 1 バイトで表現する。この場合、無線 MAC フレームペイロードに最大 255 バイト長のコンテナを最大 63 個設定することが可能となり、ペイロードの最大長約 12000 バイトを全て利用することが可能である。また、コンテナよりイーサネットフレームを取り出す際にフレームの開始位置および長さが必要となるが、コンテナの最初の 1 バイトにイーサネットフレーム長を、またその直後よりイーサネットフレームを配置し、最後に $8(L_c - 1 - L_f)$ ビットの 0 を padding として用いることとする [図 4]。その結果、無線 MAC フレームペイロードの上位層プロトコル指定のための LLC および SNAP 部を X^{8ML_c} 次を基点とした $GF(2)$ 上の不定元 X の多項式として $U_1(X)$ とし、さらにコンテナ i に格納されるイーサネットフレームの長さを 1 バイトで表現したものを $GF(2)$ 上の不定元 X の多項式として $L_i(X)$ とすると、無線 MAC フレームの FCS は次式により得られる。

$$(U_1(X) \cdot X^{8ML_c} + \sum_{i=1}^M L_i(X) \cdot X^{8(i-L_c-1)}) \pmod{G(X)} \quad (8)$$

すなわち、式 (10) は、先述のようにイーサネットフレーム自体のビット系列とは無関係に、コンテナ数、コンテナ長、イーサネットフレームの長さおよびそのフレームが格納されたコンテナの位置のみにより無線 MAC フレームの FCS が定まることを示している。従って、これらの量が事前計算可能ならば FCS 計算に要する時

間は大幅に短縮可能となる。type1 では FCS 計算に必要となる数値を事前に計算した表を作成しておきこれを利用する、いわゆる Lookup table 法を用いる。まずコンテナ長 L_c を固定する。その結果、各コンテナの終了位置が確定するため、そのコンテナに格納されるイーサネットフレーム長が分かり次第、式 (10) の第 2 項、すなわち、

$$\sum_{i=1}^M L_i(X) \cdot X^{8(i \cdot L_c - 1)} \pmod{G(X)} \quad (9)$$

の値を求めることができる。従って、事前に各コンテナ毎に、最大 $L_c - 64$ 種類のイーサネットフレーム長に対して事前計算した表を作成しておくことにより上記計算はその表から適宜値を読み出し、それらの排他的論理和を取るにより完了する。表からの値の読み出し作業は、アクセススイッチの各ポートにおいて FCS チェックを終えたイーサネットフレームのコンテナ格納時に順次実行する。また、式 (10) の第 1 項、すなわち、

$$U_1(X) \cdot X^{8ML_c} \pmod{G(X)} \quad (10)$$

の値も、コンテナ数 M およびコンテナ長 L_c のみにより確定することから事前計算が可能であり、第 2 項の計算同様、表が利用できる。表の規模は、コンテナ数および想定しているイーサネットフレーム長の範囲に依存するが、FCS 値が 4 バイトであることより、コンテナ長が最大値の場合、最大コンテナ数 63 および最大イーサネットフレーム長数 $255 - 64 = 191$ より約 48000 バイトとなる。また、例えば、IP 電話等のプロトコルによりあらかじめ同一フレーム長を持つイーサネットフレームが大量に送信されるような場合はそれに応じてコンテナ長も固定化されるため、約 300 バイトとなる。無線 MAC フレームの伝送効率の点からは、イーサネットフレーム長との差を可能な限り短縮するように多種類のコンテナ長に対する表を事前に作成しておくことが望ましいが、表数は作成に要するメモリ等のコストと処理時間とのトレードオフの関係により決定することとなる。

本稿で提案した方式は type0 および type1 共に格納するイーサネットフレームの個数およびフレーム長を示すために、それぞれ 1 バイトの領域を確保しているが、この制約は必要事項ではない。無線 MAC フレームの伝送効率はやや低下するが、それぞれ 2 バイト長確保することにより、フレーム個数およびフレーム長共に理論的な最大値を示すことができる。また、IEEE802.11n/ac 等で提案されているフレームアグリゲーション技術とも対立の関係にはなく、特に type1 の場合、MPDU(MAC Protocol Data Unit) サブフレーム内の無線 MAC ヘッダ部分が同一であることより、より効果的にイーサネットフレームの多重化が可能となる。さらに式 (4) に示したように、イーサネットフレーム自身のビット系列が無線 MAC フレームの FCS 計算に全く影響を与えない理由は、イーサネットフレームおよび無線 MAC フレームが共に FCS 生成のために使用している生成多項式が同一であることにある。従って、この条件のみ満たせば必ずしも有線技術である必要はなく、アクセススイッチが IEEE802.11 形式の無線技術により各クライアント端末からのデータを受信するとしても、本稿で提案する方式は成立する。但し、この場合は、MU-MIMO(multi-user Multiple-Input Multiple-Output) や MU-OFDMA(multi-user Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 等の技術

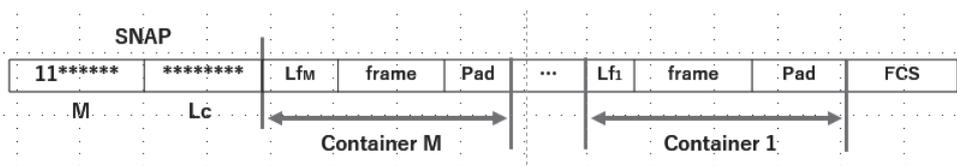


図 4 type1 フレームフォーマット

によりクライアント端末とアクセススイッチ間の通信を全二重方式とすること等も含めて幾つかの制約を課す必要がある。

3 まとめ

本稿では、無線技術の一つである IEEE802.11 により、効果的に DIX 型イーサネットフレームを搬送するために IEEE802 の枠組みに準拠した具体的なフレーム構成を複数案提案した。本稿で提案する方式では、DIX 型イーサネットおよび IEEE802.11 が共にその FCS 計算において同一の生成多項式を使用していることに注目しその特徴を利用している。特に type1 として提案した方式により、例えば IP 電話で使用される G.729 等の特定プロトコルのように比較的短い同一長のイーサネットフレームを大量に処理する必要があるような場合、その用途に限定した連結コンテナを事前に用意しておくことにより無線 MAC フレーム構成に伴う処理時間の大幅な短縮が期待できる。

参考文献

- [1] Cisco Networking Academy, Connecting Networks Companion Guide, Cisco Press ,2014
- [2] Monica Paolini ,” Wi-Fi 7: The next generation in the evolution of Wi-Fi” , Sep., 2020
<https://www.fiercewireless.com/sponsored/wi-fi-7-next-generation-evolution-wi-fi>
- [3] Albert Choi, Mehdi Karamollahi, Carey Williamson, and Martin Arlitt,”Zoom Session Quality: A Network-Level View”,Passive and Active Measurement: 23rd International Conference, PAM 2022,March,2022
- [4] Matthew S. Gast ,802.11ac: A Survival Guide, O’Reilly Media, Inc.,2013
- [5] IEEE802 Numbers :<https://www.iana.org/assignments/ieee-802-numbers/ieee-802-numbers.xhtml>
Last Updated 2022-02-22
- [6] Philip Koopman,” 32-Bit Cyclic Redundancy Codes for Internet Applications”, Preprint of a regular paper to appear in The International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN) 2002