Vol.2017-MBL-84 No.18
Vol.2017-CDS-20 No.18
2017/8/30

高密度ユーザ集中環境下でのIEEE802.11adの認証とデータ通信におけるFast Initial Link Setup（FILS）の適用効果

櫛田 裕樹[1,a)]　真野 浩[2]　高井 峰生[3]　劉 志[1]　石原 進[1,b)]

概要：ミリ波を用いる無線 LAN 標準規格である IEEE802.11ad は，広い周波数帯域を利用することで高速かつ大容量の通信が可能である．しかしながら，ミリ波は伝搬損失が大きく伝送距離が短いため指向性アンテナを用いる必要がありセルサイズが小さくなる．そのため，移動しながらの利用には単一セルの滞在時間が短くなるためハンドオーバー時のオーバーヘッドが相対的に大きくなる．そこで，IEEE802.11ai として標準化されている FILS（Fast Initial Link Setup）を用いることを検討する．FILS を用いることで，初期接続時間の短縮化を図り，セル滞在中のデータ通信時間をできるだけ長く確保する．これまでに筆者らは，FILS と従来型の無線 LAN 認証方式 WPA2 エンタープライズに関して，シミュレーションにより IEEE802.11ad における初期接続処理における FILS の効果を調べた．本稿では，IEEE802.11 無線 LAN の認証における主要パラメータが及ぼす初期接続時間への影響についてシミュレーションにより調査し，加えて認証完了後のデータ通信を考慮した FILS の効果をシミュレーションにより確かめた．その結果，FILS を使用することで帯域使用率の高い環境における新規端末の初期接続に起こる影響を軽減できることが確認できた．

Kushida Hiroki[1,a)]　Mano Hiroshi[2]　Takai Mineo[3]　Zhi Liu[1]　Ishihara Susumu[1,b)]

1. はじめに

スマートフォンなどの無線 LAN を使用する機器の爆発的な普及により，無線 LAN 通信の総トラフィック量は大きく増加している [1]．そのため，Wi-Fi 及びセルラーネットワークにおいて既存の 10GHz 帯以下の周波数の使用状況は逼迫しており，これ以上の大容量化は困難である．この課題に対し，60GHz 帯のミリ波を無線 LAN に使用することが解決策の一つとして考えられており，今後の開発が注目されている [3]．IEEE802.11ad は，60GHz 帯の周波数を使用する無線 LAN の標準規格である [2]．IEEE802.11ad では，1 チャネルあたり 2.16GHz もの広い帯域を利用できるため，チャネルボンディングや MIMO などの技術を利用しなくても非常に高速（最大約 7Gbps）な通信が可能である．しかしながら，ミリ波は伝搬損失と遮蔽損失が大きいため，一台のアクセスポイント（AP）ごとの通信可能範囲は狭くなる．IEEE802.11ad では指向性アンテナとビームフォーミング技術を使用することで通信可能範囲を確保している．その上で IEEE802.11ad の想定利用距離は 10m 程度となっている [2]．

ミリ波無線 LAN のカバレッジの狭さにより，ユーザが移動しながら利用する際に生ずる課題として，単一セルに滞在する時間が短くなるためデータ通信可能な時間が短いこと，ハンドオーバーの頻度が高くなることの 2 点が挙げられる．IEEE802.11 無線 LAN では，ある AP と端末が無線 LAN 通信を行う際に初期接続の処理として，基地局検

[1] 静岡大学
Shizuoka University
[2] コーデンテクノインフォ
KODEN TECHNO & INFO
[3] スペースタイムエンジニアリング
Space-time engineering
[a)] kushida@ishilab.net
[b)] ishihara@ishilab.net

ⓒ 2017 Information Processing Society of Japan

索，暗号化通信路の確立，IP 通信のための設定（IP アドレス，DNS サーバの IP アドレス，デフォルトルータの通知など）のための十数回のパケット交換が必要となる．初期接続処理の手法には様々なものがあるが，現在最も広く用いられているの一つに Wi-Fi Protected Access 2 (WPA2) エンタープライズがある．WPA2 エンタープライズはセキュリティは高いが，必要なパケット交換の回数が多く，ハンドオーバーの度に初期接続処理が行われることでデータ通信の時間が減ってしまう．

これら 2 点の課題に対する解決策の一つに Fast Initial Link Setup（FILS）がある [4]．FILS は IEEE802.11ai で提供される機能で，認証に必要なパケット交換回数を大幅に削減できるため，単一セル滞在中の通信時間の確保と高頻度なハンドオーバによる通信時間のロスを抑えることが可能である．FILS の初期接続時間の短縮効果について，従来の無線 LAN においては，市販機器を (2.4GHz, IEEE802.11g) 使用した測定実験によって既に確かめられている [5]．しかしながら，IEEE802.11ad ミリ波無線 LAN における FILS の効果は確認されていなかった．IEEE802.11ad は，既存の 2.4GHz，5GHz の帯域を用いる無線 LAN と比べて様々な点で異なっている．例えば，通信速度が非常に高速であることや，指向性アンテナのビーム方向の調整のために，AP と端末間で従来無線 LAN より多くの制御フレームを交換する必要があることなどが挙げられる．そのため，[5] で確かめられた FILS の効果は IEEE802.11ad 無線 LAN において異なる可能性が高い．

そこで筆者らは，IEEE802.11ad に FILS を適用した場合の初期接続所要時間の短縮効果を確認するため，IEEE802.11ad 上で，WPA2 エンタープライズと FILS の 2 つの認証手法を使用して複数端末の同一 AP に対する初期接続をシミュレーションし，その所要時間と成功率を比較評価した [6]．本稿では，[6] ではシナリオに含めていなかった認証完了後のデータ通信が認証処理に及ぼす影響について考慮したシミュレーションを行った．複数の端末が同一の AP とデータ通信を行っている環境で，新規に端末が初期接続を試みるシナリオに対し，FILS が与える影響についてシミュレーションにより評価した．さらに [6] で行ったシミュレーションのパラメータを見直すとともに，初期接続の遅延発生要因について詳細に検討を加えた．以下，2 章で IEEE802.11ad と既存の無線 LAN 認証方式について概要を述べる．3 章で，IEEE802.11ai で標準化されている FILS について記述する．4 章で，シミュレーションに用いた WPA2 エンタープライズと FILS の認証処理のモデルについて記述する．5 章で，シミュレーション評価について記述し，IEEE802.11ad における FILS の初期接続処理の所要時間短縮効果と，通信トラフィックによる認証処理に対する干渉の影響を軽減する効果について議論する．6 章で本稿をまとめる．

2. IEEE802.11ad と無線 LAN 認証規格

本章では，本稿のシミュレーションで用いたミリ波無線 LAN 標準規格である IEEE802.11ad の概要と，FILS に関する説明の準備として，本稿で FILS との比較に使用した無線 LAN 認証の既存方式について概要を述べる．

2.1 IEEE802.11ad

IEEE802.11ad は，60GHz 帯のミリ波を用いる無線 LAN の標準規格である [2]．2016 年 10 月に Wi-Fi Alliance による本規格対応製品の認定プログラムの実施が発表された．1 チャネルあたり 2.16GHz もの広帯域を利用でき高速かつ大容量の通信が可能だが，伝搬損失及び遮蔽損失が大きく単一 AP あたりのカバレッジが狭くなる．そのため，指向性アンテナとビームフォーミング技術は必須とされている．この点が従来無線 LAN と大きく異なる点で，MAC プロトコルやセキュリティプロトコル等に関しては従来無線 LAN と同等のものが使用される．

通信対象へ向けてのアンテナ制御は，Sector-Level Sweep (SLS) と Beam Refinement Protocol (BRP) の 2 段階に分けて行われる．1 段階目の SLS では，Series of sector sweep (SSW) フレームが AP と端末間で交換される．このフレームは AP に搭載された指向性アンテナの複数のセクターから送信され，通信対象である端末からのフィードバックを元に最も信号強度の高いセクターを選択する（図 1）．その後 BRP で，選択したセクターで同様に AP と端末が制御フレームを送受信することで更に微調整を行う．SLS は Beacon 送信後の一定期間の間に行うことが規定されており，BRP については SLS の後でさえあれば必要に応じて実施される．

2.2 WPA2 エンタープライズモード（PEAP）での認証処理

WPA2 は IEEE802.11i として標準化されている IEEE802.11 無線 LAN で広く利用されている無線 LAN のセキュリティプロトコルである [7]．WPA2 には 2 つのモードがあり，1 つは主に家庭内 LAN などで利用される WPA2 パーソナルモードで，もう 1 つは，企業や公共機関などで利用される WPA2 エンタープライズモードである．本稿では WPA2 エンタープライズモードを扱う．WPA2 エンタープライズモードは IEEE802.1X という認証規格を使用するモードである．

IEEE802.1X は，有線 LAN と無線 LAN の両方で使用されるユーザ認証の規格である．企業や大学など多数の AP によって構成される大規模なネットワークで最も広く使用されており，高いセキュリティを得られる．端末は AP を介して認証サーバと Extensible Authentication Protocol（EAP）により認証処理を行う [8]．EAP は拡張

ⓒ 2017 Information Processing Society of Japan

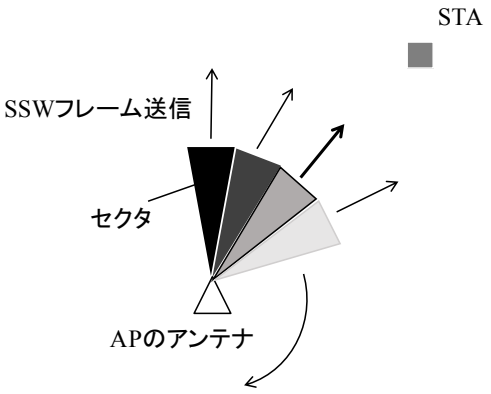


図 1 Sector-Level Sweep（SLS）の動作図

可能な認証プロトコルで，EAP 上で動く認証プロトコルは様々なものが存在する．本稿では，Protected-Extensible-Authentication-Protocol（PEAP）を使用する [10]．PEAP は最も広く使われている認証方式の 1 つである．

PEAP は，IEEE802.1X 認証において現在最も広く用いられている認証方式の一つである [10]．PEAP の一般的な認証手順を図 2 に示す．AP が送信する Beacon を受け取った端末は，AuthenticationRequest/Response フレームと AssociationRequest/Response フレームを AP と交換する．

その後，サプリカントと呼ばれる IEEE802.1X 認証を行うアプリケーションが動作し，認証処理が開始される．認証手法に PEAP を使用する場合，ユーザ認証を行う前に認証用パケット交換のための暗号化回線が生成される．この暗号化回線生成には TLS という暗号化プロトコルが用いられ，ここで生成された暗号化回線路は TLS トンネルと呼ばれる [12]．TLS トンネル内でユーザ認証用パケットが交換される．

認証が成功すると，データ通信の暗号化に用いる鍵情報が認証サーバから端末へ渡される．その鍵情報を元に，4WayHandshake と呼ばれる手順で暗号化鍵が AP と端末間で生成，共有される．その後，Dynamic Host Configuration Protocol（DHCP）を用いて IP 通信のための設定がされ，データ通信が可能となる．

3. IEEE802.11ai（FILS）

IEEE802.11ai は，端末と AP の初期接続の効率化，高速化を目的とした無線 LAN 規格である．FILS とは，IEEE801.11ai の主要な機能の総称である．今回のシミュレーションに使用した FILS の機能は，Extensible Authentication Protocol -Re- authentication Protocol (EAP-RP) のみである．EAP-RP は，認証に必要なフレームの数を大きく減らすことが可能な認証手法である．以下，FILS の重要な機能について概要を述べる．

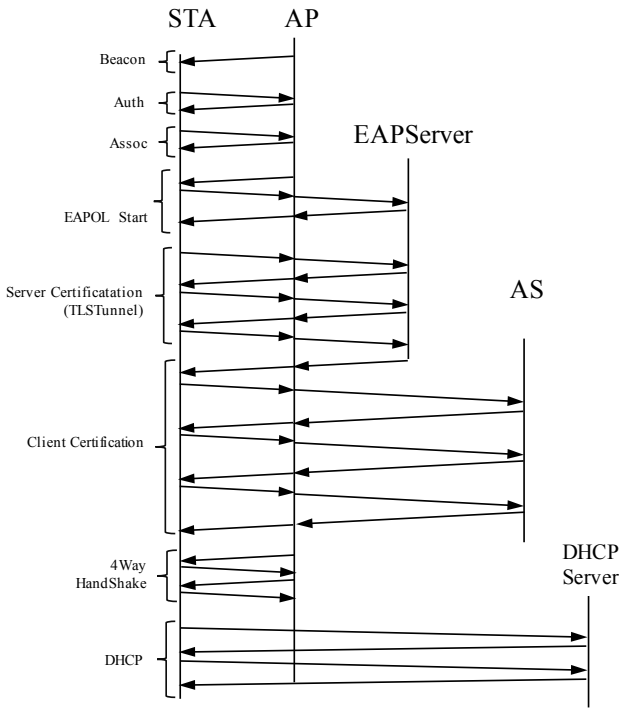


図 2 一般的な WPA2 エンタープライズ（PEAP）の認証手順

3.1 チャンネルスキャンの高速化

IEEE802.11 無線 LAN において，通常 AP は 100ms の間隔で Beacon フレームを送信する．FILS は，FILSDiscovery フレームと呼ばれる通常の Beacon フレームより含める情報を絞ったフレームを通常の Beacon フレーム間隔の間に送信することで，チャンネルスキャンを早めることができる．FILSDiscovry フレームに最低限含めなくてはならない情報は AP の SSID のみと定められている．

3.2 アクティブスキャンの効率化

アクティブスキャンとは，端末が AP へ ProbeRequest を送信することで認証要求をすることである．端末 A が AP へ ProbeRequest を送信する際，他の端末 B の ProbeRequest 送信を監視する．端末 B の ProbeRequest 送信が確認できた場合，端末 B の ProbeRequest に対する AP の ProbeResponse が返送されるので，端末 A は ProbeRequest を送信せず，AP が端末 B 向けに送信した ProbeResponse を利用する．また，IEEE802.11ai では ProbeRequest に ProbeResponse を待ち受ける制限時間を含める．制限時間内に ProbeResponse を受け取れなければ，端末は別のチャネルをスキャンする．AP 側が制限時間を過ぎた Request を受信したら ProbeResponse を返送しない．さらに，AP は ProbeResponse を送信する際，同一 Extended Service Set (ESS) 内の他の AP の情報も含める．これらのしくみによって，ProbeRequest 及び ProbeResponse の総数は減り，帯域使用量を抑えることができ，スキャンの効率改善が見込める．

ⓒ 2017 Information Processing Society of Japan

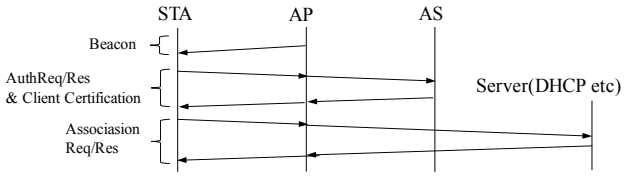


図 3 一般的な FILS (EAP-RP) の認証手順

3.3 EAP-RP による認証手順短縮

EAP-RP は，初期接続処理に必要なフレームの数を大幅に減らすことが可能な無線 LAN 認証手法である [11]. 端末が一度何らかのサービスを提供するサーバに接続したとき，その認証情報がネットワーク上のあるサーバに保存されており，次回接続時にその認証情報を使用することで，初期接続処理を短縮できる．一般的な EAP-RP の認証手順を図 3 に示す．PEAP の場合と異なり，端末が Beacon を受信した後の Authentication フレーム交換において保存された認証情報の照会がなされる．その後 AssociationRequest/Response フレームが交換される．このフレームには IP 通信のための設定など上位層向けの情報も含まれており，AuthenticationResponse 受信をもってデータ通信が可能となる．

4. シミュレーションモデル

本章では，評価に使用した WPA2 エンタープライズと FILS の認証手順のシミュレーションモデルについて記述する．本稿のシミュレーションは各手法における認証に必要なパケット数の違いに注目しているため，これまでに述べた両手法の一般的な認証手順を元に簡略化した．シミュレータはスペースタイムエンジニアリング社の Scenargie を使用した [13]．Scenargie は並列離散事象シミュレータある．詳細なネットワークシミュレーションが可能で，シナリオ設定のための地理情報システム（GIS）データ管理機能をサポートしている．

4.1 WPA2 エンタープライズ（PEAP）

WPA2 エンタープライズ（PEAP）の認証手順のモデルを図 4 に示す．図 4 中の点線で示した AP と各種サーバとのパケット交換はすべて省略し，省略部分の処理遅延は一切無いものとした．実線で示しているパケット交換を行う部分について，各パケット送受信時の処理遅延は無いものとした．この理由は，WPA2 エンタープライズは外部サーバの実装に依存する処理が多く，それらの処理遅延は各パケット送受信よりも大きいため，外部サーバ遅延を考慮するとその遅延が原因で FILS との初期接続所要時間の差が大きく出てしまうからである．今回のシミュレーションでは，認証に必要なパケット数の違いによる差を明確にするため，外部サーバを用いた処理は十分に速い（処理遅延=0）という条件のもとで行った．

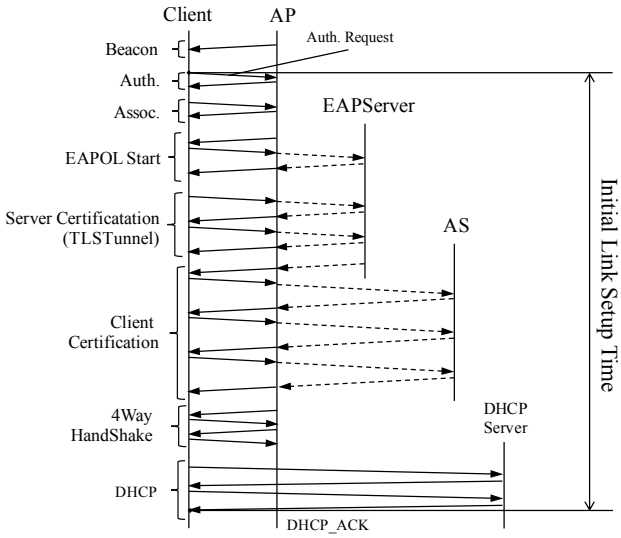


図 4 WPA2 エンタープライズ（PEAP）の認証手順のシミュレーションモデル

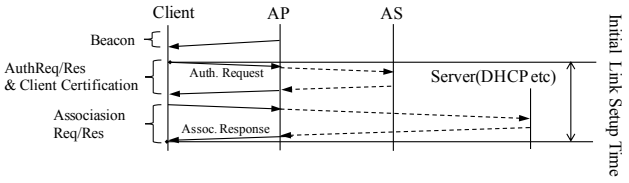


図 5 FILS (EAP-RP) の認証手順のシミュレーションモデル

4.2 FILS(EAP-RP)

FILS（EAP-RP）の認証手順のモデルを図 5 に示す．図 5 中で点線で示したパケット交換は省略し，処理遅延は一切無いものとした．これは，前節で述べた WPA2 エンタープライズの条件と合わせるための設定である．今回のシミュレーションでは，端末が AP の発する Beacon を受信した後から先の処理を初期接続としてその所要時間を比較するため，FILSDiscovery フレームは使用しない．今回のシミュレーションはパッシブスキャンの場合のみを考慮したため，ProbeRequest/Response の総数を減らす機能は含んでいない．IP アドレスの割り当ては WPA2 エンタープライズとは異なり，端末が AssociationResponse フレームを受信することで完了するものとした．

5. シミュレーション評価

本章では，IEEE802.11ad における FILS の初期接続時間を短縮する効果を確認するため，FILS と WPA2 エンタープライズの 2 手法による初期接続の時間（データ通信が可能になるまでの時間）を比較した．[6] では，認証本稿では以下の 2 つのシナリオを用いて評価を行った．

(1) 同一セル内で複数の端末が一斉に同一の AP に対し認証処理を開始するシナリオ．
(2) 同一セル内で複数の端末が同一の AP とデータ通信を行っている環境に，新規に端末が認証処理を行うシナ

表 1 シミュレーションパラメータ

パスロスモデル	Free Space
中心周波数	59.400GHz
チャネル帯域幅	2,160MHz
通信規格	IEEE 802.ad
送信電力	20dBm
AP のアンテナパターン	半値幅 90 度, 最大利得 8.4dBi
端末のアンテナパターン	Isotropic
Modulation/Coding	MCS4 (Single Carrier, Max. 1.155Mbps)
Beacon 送信間隔	100ms
ChannelScanTimeout	100ms
AuthenticationTimeout	100ms
AssociationTimeout	100ms
UDP パケットサイズ	1,470Bytes
MAC	EDCA

リオ.

5.1 シミュレーションシナリオ

5.1.1 端末と AP の配置

AP と端末の配置を図 6 に示す．25 台の端末を 1m の高さに，0.5m 間隔で格子状に配置し，1 台の AP を中央の端末の真上 1.5m の位置に配置した（端末を表す記号の種類については後述）．これは，ホールやスタジアムなどの座席に天井から真下へアンテナを向けていることを想定して AP を配置した．図中で AP のアンテナから出ている三角形は指向性アンテナの放射を表している．スタジアムの客席のように密にユーザが存在し，かつ AP が密に配置される状況では，一つのセクタで十分に多くの STA をカバーでき，ビームパターンを変更する必要がない場合が考えられる．そのため，今回のシナリオで使用したアンテナのセクタ数は 1 つで，ビームは固定している．指向性アンテナ制御用フレームの交換はされているが，アンテナの向き、ビームパターンが変わることはない．初期接続時間を各手法で以下のように定義した．

FILS

端末が AuthenticationRequest を送信した時刻から，AssociationResponse を受信した時刻まで.

WPA2 エンタープライズ

端末が AuthenticationRequest を送信した時刻から，DHCP_ACK を受信した時刻まで.

以上に示した環境で，以下に示す 2 つのシナリオで WPA2 エンタープライズと FILS の各認証手法による初期接続時間を測定した．シミュレーションパラメータ表 1 に示す.

5.1.2 シナリオ 1 (複数端末の同時初期接続)

同一セル内で複数の端末が一斉に認証処理を開始した場合の FILS の効果を評価する．配置した 25 台の端末のうち，1 台，9 台，25 台を使用する 3 パターンでシミュレーションを行った．1 台のみ使用する場合は中央の端末を使用し，9 台使用する場合は白い丸で示した端末を使用した．25 台使用する場合は図 6 中のすべての端末を使用した.

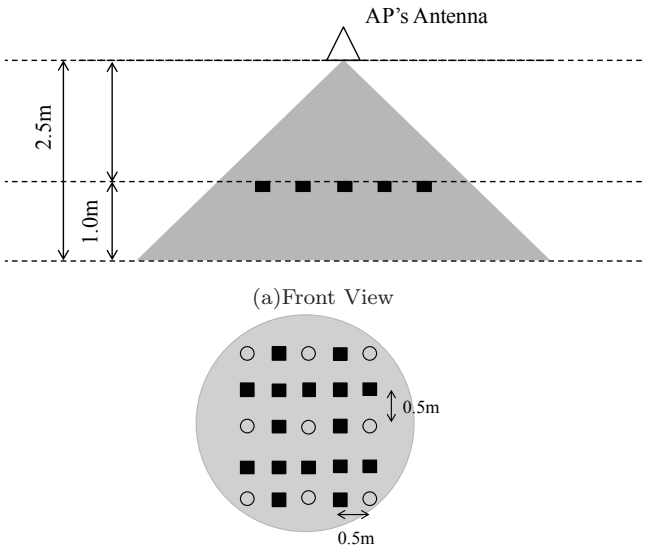


図 6 AP と端末の配置図

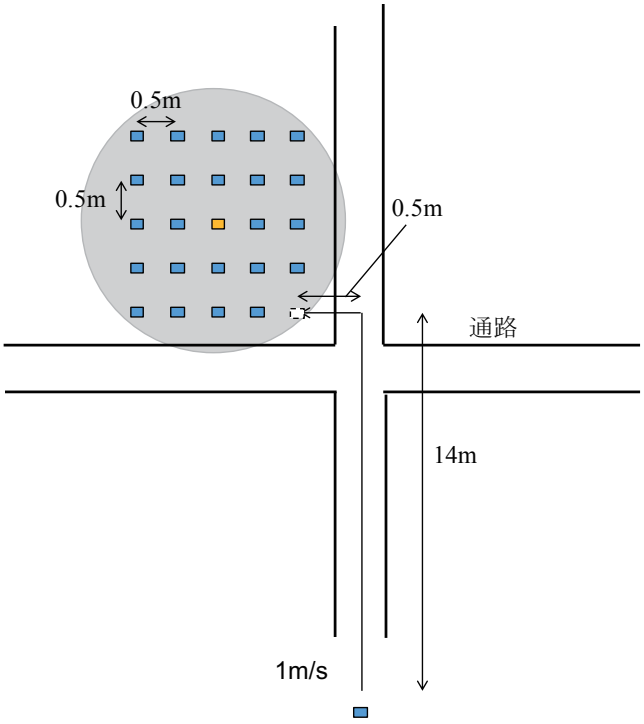


図 7 AP と端末の配置図（シナリオ 2）

端末を複数使用する場合，各端末が AP へ接続を試みるまでの時間にばらつきを与えた．シミュレーション開始時刻から，端末が Beacon のスキャンを開始するまでの時間の最大値を，0s，0.1s，0.2s，0.5s，1s の 5 通り与えた．各端末は与えられた値以下の時間をランダムに選択し，選択した値の時間だけ Beacon のスキャン開始時間を遅らせる．図 8 に Beacon のスキャン開始にばらつきを与えた場合の

ⓒ 2017 Information Processing Society of Japan

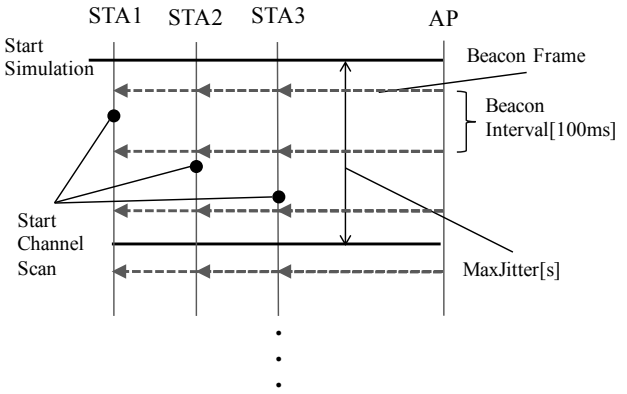


図 8 各端末の Beacon スキャン開始時刻のばらつき

各端末の動作について示す．各端末は黒点で Beacon のスキャンを始める．各認証方式で，Beacon のスキャン開始時刻のばらつきの値ごとに 100 回ずつ異なるシード値を用いてシミュレーションを行った．

5.1.3 シナリオ 2（帯域使用率の高い環境における新規端末の初期接続）

同一セル内で複数の端末が帯域を使用している環境において，新規の端末が認証処理を行うとき，その処理に FILS が与える効果を評価する．図 6 で示す 25 台の端末のうち，右下の 1 台以外が AP とデータ通信を行っている．そこへ，通路を通って右下の座席に新規ユーザが着席しに来るというシナリオである（図 7）．新規端末は移動中から Beacon をスキャンしており，Beacon を受信でき次第認証処理を開始する．各端末と AP の間で Iperf により上りと下り両方で UDP パケットを送信した．それぞれの場合で，送信側のトラフィック量を送信バッファが空にならない程度に維持させた．

5.2 シミュレーション結果

5.2.1 シナリオ 1(複数端末の同時初期接続)

端末を 1 台のみ配置した場合の各方式の初期接続所要時間の平均を表 2 に示す．端末は 1 台のみであるので，他のパケットとの衝突は起こらない．さらに，ホスト上の処理遅延は無いものとしているため，両方式の初期接続所要時間の差の原因は，認証処理に必要なパケットの数と，パケット長のみである．表 2 に示すとおり，FILS を使用することで WPA2 エンタープライズを使用した場合と比べて約 10 倍高速化できている．これは，認証に必要なフレーム数が FILS の場合 WPA2 より少ないからである．

端末を 9 台使用した場合と 25 台使用した場合の初期接続所要時間の CDF を図 9, 10 に示す．各グラフの横軸は対数軸である．これらの図より，以下のことが観察できる．

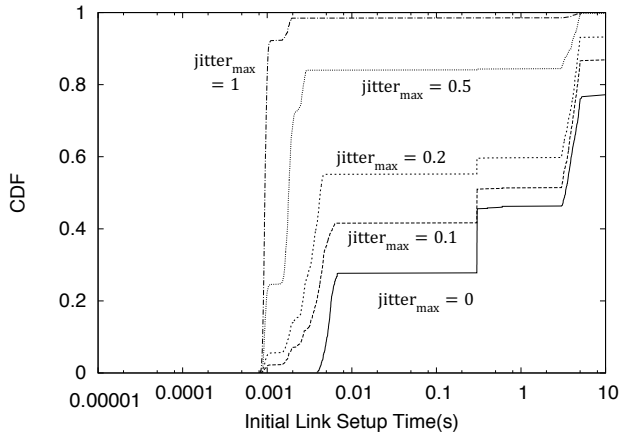
- Beacon スキャン開始時刻のばらつきの値が大きくなるにつれ，両方式とも同じ所要時間での認証成功端末数が増加している．これは，ばらつきの値が大きくなるほど同時に AP に初期接続を試みる端末数が減ることになり，各認証フレームの衝突及び MAC プロトコルによる競合が減るためである．
- 各グラフにおける，CDF が最初に大きく上昇する部分はシミュレーション開始後，初めて受信した Beacon に対し初期接続処理を行い，その処理がタイムアウトすること無く完了した端末群を示している．いずれの場合も FILS を使用した場合のほうが上昇幅は大きく，Beacon スキャン開始時刻のばらつきの値による影響も小さい．
- WPA2 エンタープライズを使用した場合のグラフ中に所要時間が 10s に達しても CDF が 1 に満たない部分がある．これは，認証パケットの交換に失敗し続けたためにサプリカント上でタイムアウトとなったことを表している．一般的な IEEE802.1X 認証におけるサプリカントでのタイムアウト時間は数 10 秒と設定されている．
- CDF の値が伸びずに平坦になっている部分が全てのグラフにおいて存在する．これは，他のパケットとの干渉により一度認証に失敗した端末が，再び Beacon のスキャンを開始するまでの時間を表している．AP 及び端末は，ある認証パケットを規定回数再送しても応答がなかった場合，その認証パケットの最初の送信時刻から 0.1s 後にその処理をタイムアウトによりキャンセルする．その後 Beacon のスキャンを開始するが，端末は混雑を避けるために前回の AP からの Beacon には応答しない．今回のシミュレーションでは AP は 1 台のみ配置しているため，端末は新たに別の AP を見つけることはなく，スキャン開始から 0.1s 後にそのスキャンはタイムアウトによりキャンセルされる．その後再びスキャンを開始するが，その際は以前に除外した AP が発する Beacon に対しても応答する．以上で示した，最初のタイムアウトから次々回のビーコン受信までの間隔がグラフの平坦な部分に現れている．

表 2 端末 1 台使用時の各認証方式の初期接続所要時間

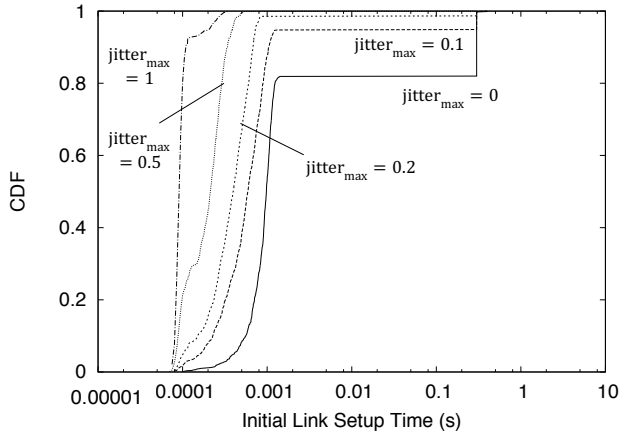
	WPA2-Enterprise	FILS
Initial link set up time	0.922ms	0.092ms

5.2.2 シナリオ 2（帯域使用率が高い環境における新規端末の初期接続）

下りトラフィックを発生させた場合と上りトラフィックを発生させた場合の新規端末の初期接続所要時間の CDF を図 11 に示す．横軸は対数軸である．トラフィックの方向にかかわらず，WPA2 エンタープライズを使用した場合は認証処理に大きく遅延が生じている．表 2 で示した伝送路に妨げがない環境で端末 1 台が認証処理を行った場合の所要時間（0.922ms）と比較すると，1ms 以下で認証を完

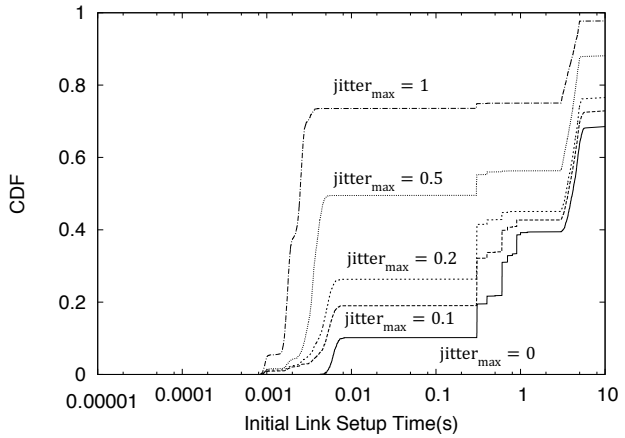


(a) WPA2 エンタープライズ（PEAP）

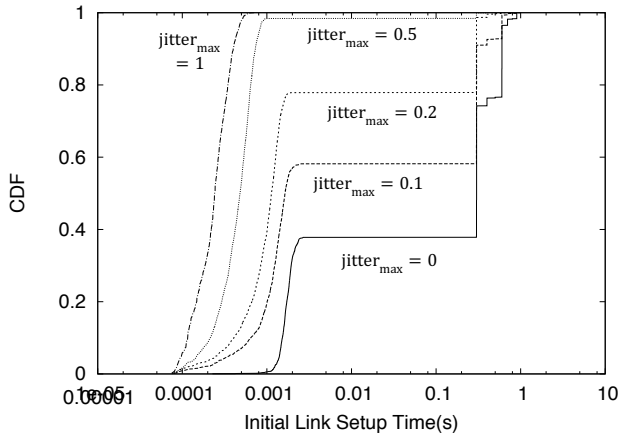


(b) FILS (EAP-RP)

図 9 配置端末 9 台の認証方式ごとの初期接続所要時間の CDF



(a) WPA2 エンタープライズ（PEAP）



(b) FILS (EAP-RP)

図 10 配置端末 25 台の認証方式ごとの初期接続所要時間の CDF

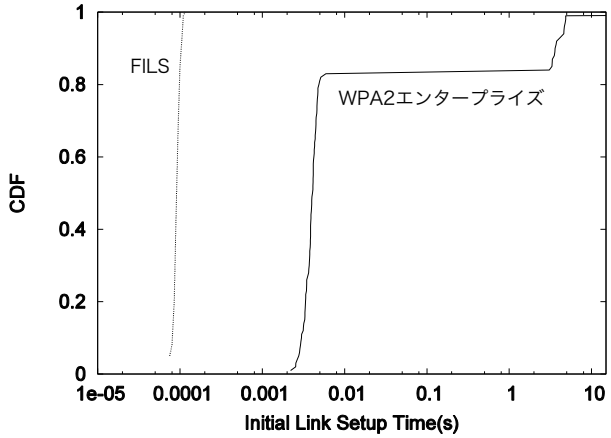
了している端末は存在しない．下りトラフィックを発生させた場合は 8 割，上りトラフィックを発生させた場合はわずか 2 割の端末が 1ms 付近の時間で認証を完了しているが，それ以外の端末は認証完了に 1s 以上かかっている．下りトラフィックを発生させた場合よりも上りトラフィックを発生させた場合の方が認証処理の遅延が大きい原因は，1 台の AP からそれぞれの端末へ向けてデータが送信される下りトラフィックと違い，上りトラフィックの場合，複数の端末が同じ AP へデータ送信を試みるので，各端末間で MAC プロトコル上の競合が発生するためである．一方 FILS を使用した場合は，表 2 で示した所要時間（0.092ms）と比較しても，ほぼすべての端末が 0.1ms 以下で認証処理を完了しており，発生させたトラフィックによる認証処理の遅延は見られない．WPA2 エンタープライズでは FILS と比べて認証に必要なパケットの数が多く，さらに DHCP による IP アドレス割り当てに必要な通信が UDP 上で行われるため，発生させたトラフィックとの競合の影響が大きくなると考えられる．

6. 結論

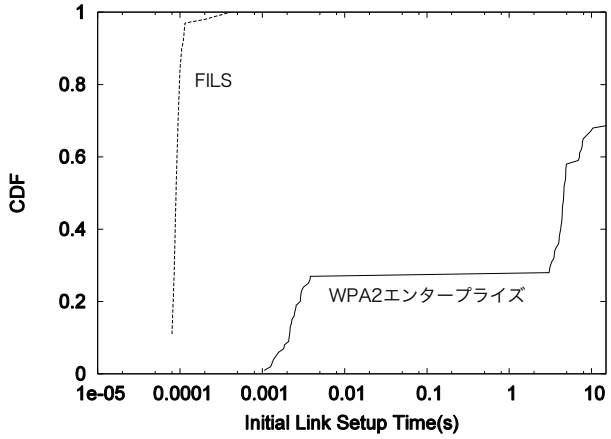
本稿では，IEEE802.11ad ミリ波無線 LAN における無線 LAN 高速認証手法である FILS の効果を確かめるために，現在最も広く用いられている無線 LAN 認証手法の一つである WPA2-Enterprise を用いた場合と FILS を用いた場合との端末認証の所要時間をシミュレーションによって比較し，評価した．また，単一セル内で複数の端末が AP と密にデータ通信を行っている環境に対し，新規に端末がセルに入り認証処理を行うというシナリオにおける，FILS が新規参入端末の認証処理に与える影響をシミュレーションによって評価した．その結果，帯域使用率が高い環境下であっても，FILS を使用することで新規に行われる認証処理が受ける影響はトラフィックが流れていない場合と同様程度まで抑えられることが確認できた．

今後の考慮すべき課題を 2 点挙げる．

(1) 今回のシミュレーションでは，簡略化のためビームフォーミングを考慮しなくてよくなるようなシナリオを設定し，セクター数が 1 つのみのアンテナをビームフォーミングを使用せずに固定させて使用したため，IEEE802.11ad 特有のビームフォーミングについて考慮できていない．ビームフォーミングを考慮した場合，ユーザのモビリティの設定にシミュレーション結果が大きく依存し，さらに認証処理に遅延を与えると予想



(a) 下りトラフィックを発生させた場合



(b) 上りトラフィックを発生させた場合

図 11 新規端末の初期接続所要時間の CDF

される．

(2) 本稿では，AP と各種サーバとのパケット交換はないものとして扱ったが，今後省略したパケット交換もシミュレーションモデルに組み込んだ上で評価を行う予定である．

謝辞

本研究は RAPID-5G の研究チームの協力のもとで行われたものである．ここに記すことで謝意を示す．

参考文献

[1] CISCO, Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016-2021 White Paper, 2017

[2] IEEE 802.11 Working Group, IEEE 802.11ad, Amendment 3: Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz Band, 2012.

[3] G. Athanasiou, P.C. Weeraddana, C. Fischione, and L. Tassiulas, Optimizing client association for load balancing and fairness in millimeter-wave wireless networks, IEEE/ACM Trans. Netw. vol.23, no.3, pp.836–850, June 2015.

[4] IEEE 802.11 Working Group, IEEE 802.11ai-2016, Amandment 1: Fast Initial Link Setup, 2016.

[5] 真野浩，他: 無線 LAN 高速認証 FILS（Fast Initial Link Setup）の実装及び多重アクセス制御，マルチメディア，分散，協調とモバイル（DICOMO2013）シンポジウム，pp.1634–1639, 2013.

[6] 櫛田裕樹，真野浩，高井峰生，石原進: IEEE802.11ad における Fast Initial Link Setup（FILS）の適用効果，電子情報通信学会技術研究報告書，vol.116, no.407, pp.59–64, 2017.

[7] IEEE 802.11 Working Group, IEEE 802.11i, Amendment 6: Medium Access Control (MAC) Security, 2012.

[8] B. Aboba, Microsoft, L. Blunk, Merit Network Inc, J. Vollbrecht, Vollbrecht Consulting LLC, J. Carlson, Sun, H. Levkowetz, Ed., and ipUnplugged, RFC3748: Extensible Authentication Protocol (EAP), https://tools.ietf.org/html/rfc3748, 2004

[9] C. Rigney, S. Willens, Livingston, A. Rubens, Merit, W. Simpson, and Daydreamer, RFC2865: Remote Authentication Dial In User Service (RADIUS), https://tools.ietf.org/html/rfc2865, 2000.

[10] A. Palekar, D. simon, Microsoft Corporation, J. Salowey, H. Zhou, G. Zorn, Cisco Systems, S. Josefsson,and Extundo, Internet-Draft: Protected EAP Protocol (PEAP) Version 2, https://tools.ietf.org/html/draft-josefsson-pppext-eap-tls-eap-10 2004.

[11] V. Narayanan, L. Dondeti,and Quallcomm, Inc., RFC5296: EAP Extensions for EAP Re-authentication Protocol (ERP), https://tools.ietf.org/html/rfc5296, 2008.

[12] R. Khare, 4K Associates / UC Irvine, and S. Lawrence, Agranat Systems, Inc., RFC2817: Upgrading to TLS Within HTTTP/1.1, https://tools.ietf.org/html/rfc2817, 2000.

[13] Space-Time Engineering: https://www.spacetime-eng.com

ⓒ 2017 Information Processing Society of Japan