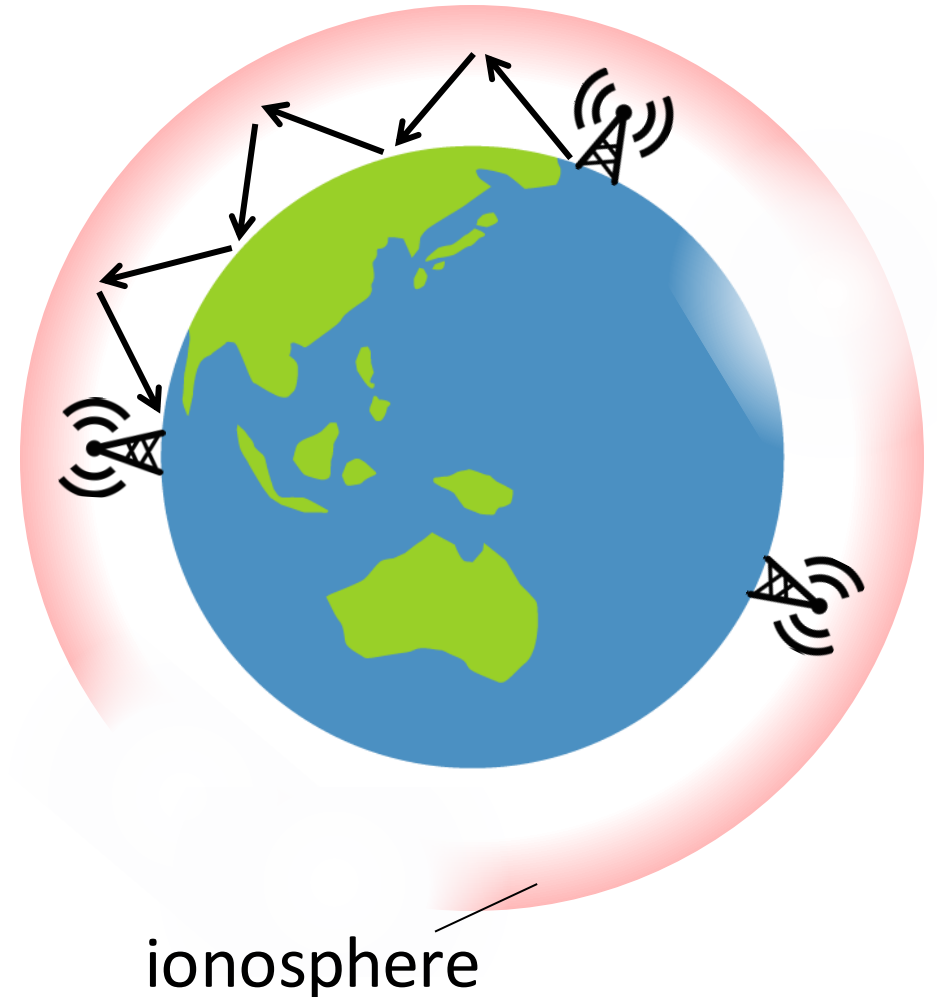


Background

- **High frequency band** (3MHz-30MHz)
 - Low power
 - No relay points
 - On a global scale
- **Ionosphere**... A layer of ionized atmosphere located above the Earth
 - Spherical layer
 - Not uniform
 - Changes with time, seasons etc.



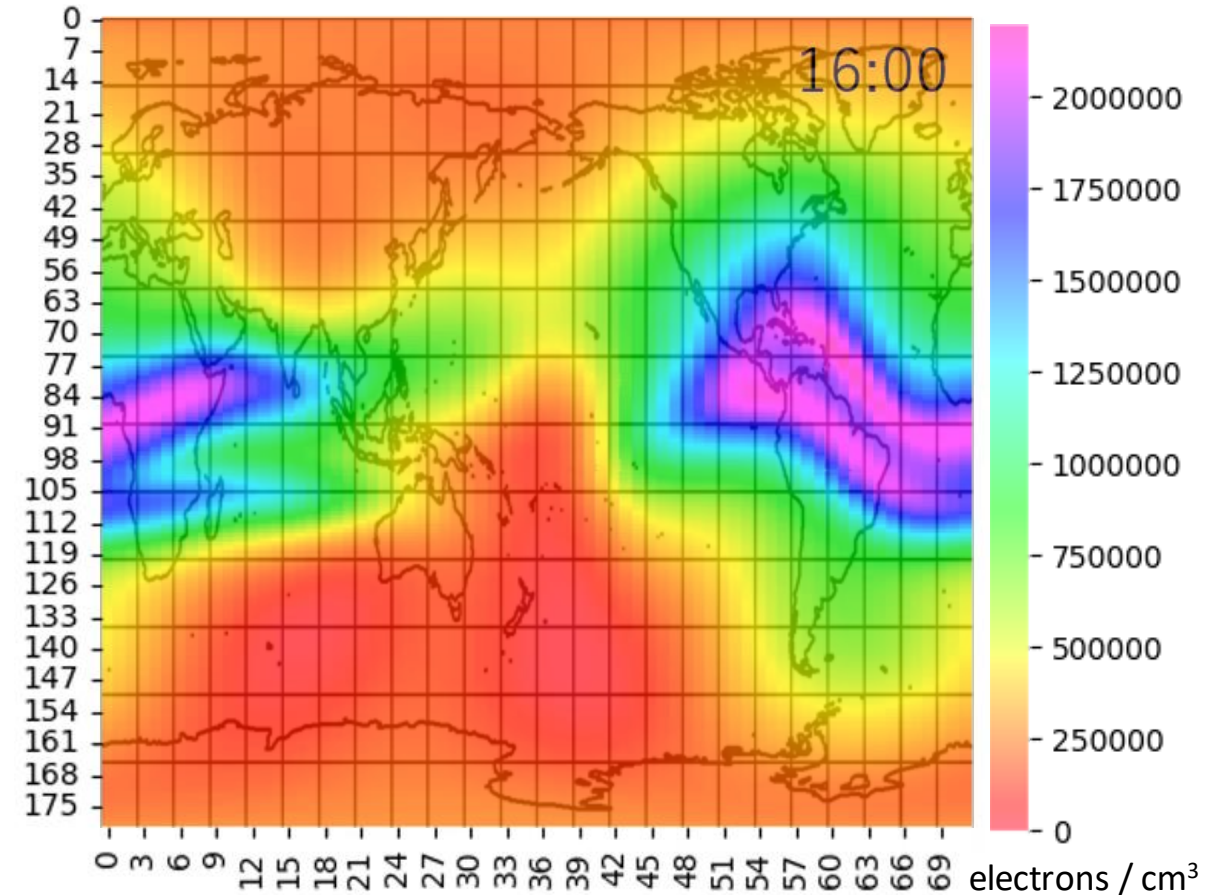
Ionospheric Electron Density

Atoms and molecules are ionized
by the sun's UV rays

Electron density

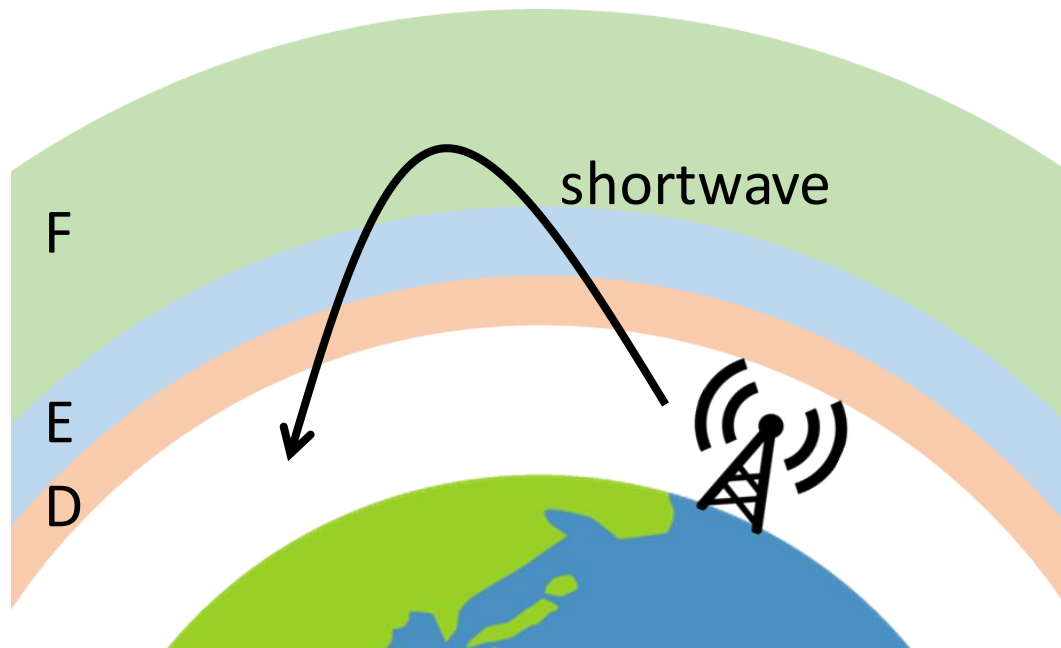
...number of electrons / cm^3
→ Changes according to the
movement of the sun

16:00(UTC) Dec 28, 2022 -
15:00(UTC) Dec 29, 2022
Calculated referring to IRI model

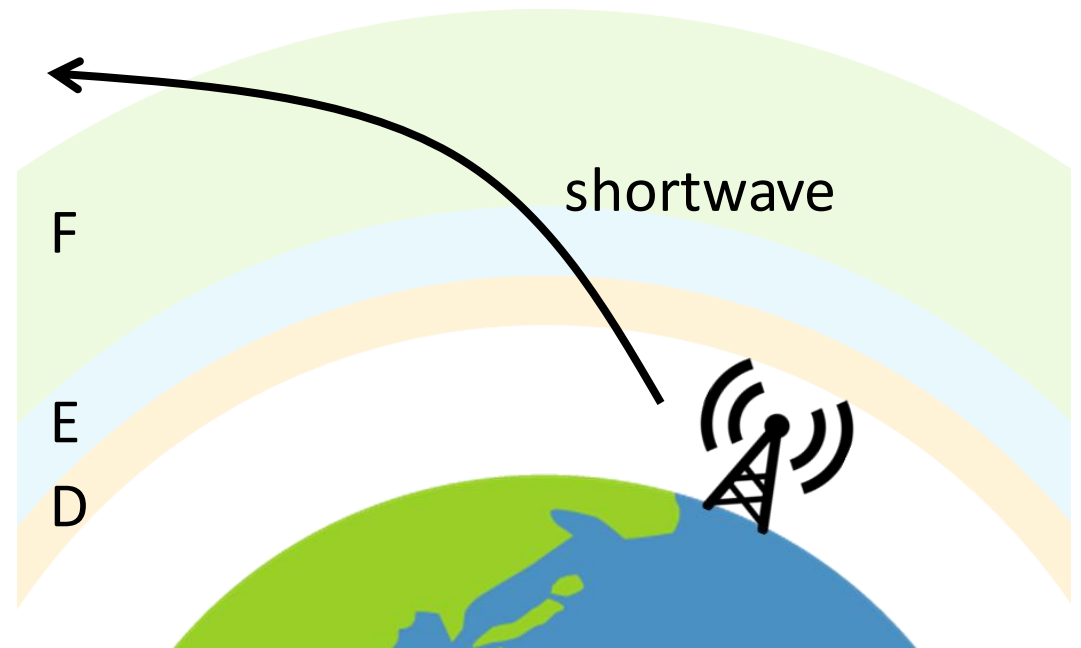


Effects of electron density

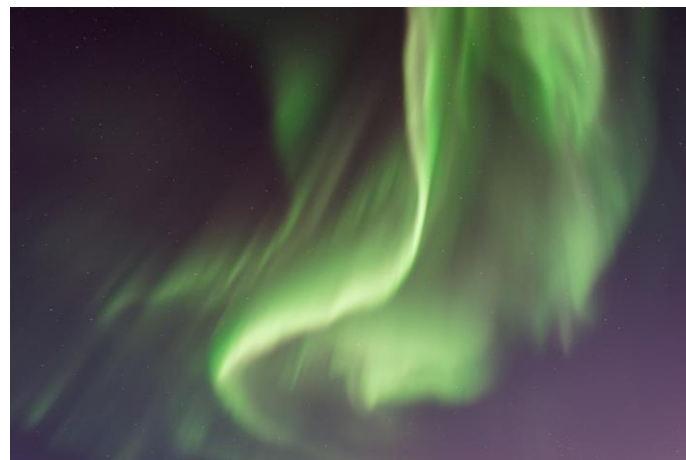
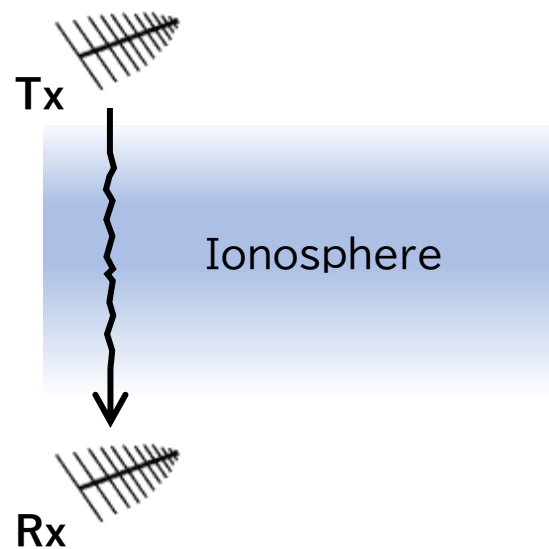
The electron density is **high**



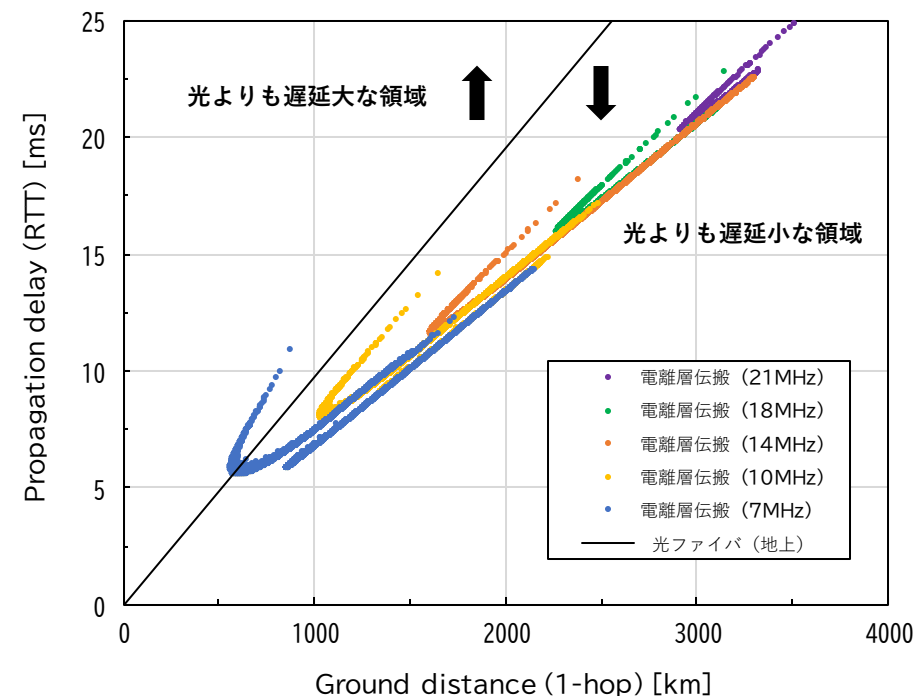
The electron density is **low**



光ファイバよりも低遅延な通信



<https://publicdomain.net/aurora-northern-light-0036769/>



利点

- 通信経路に人工物が無い
- 専用デバイスの購入は不要
- 状況次第だが光通信よりも低遅延

欠点

- 電離層の影響で通信品質が悪化
- 光通信や衛星通信と比較してスループットが低い

フェージングを
低減できないか

低遅延が求められる
ユースケースへの適用の期待

Appleton-Hartree Equation (電離層状態を表す基本式)

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - jZ - \frac{Y^2 \sin^2 \theta}{2(1 - X - jZ)} \pm \sqrt{\frac{Y^4 \sin^4 \theta}{4(1 - X - jZ)^2} + Y^2 \cos^2 \theta}}$$

$$X = \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

$$Y = \frac{\omega_H}{\omega}$$

$$Z = \frac{\nu}{\omega}$$

地球磁場を無視 $\Rightarrow Y = 0$

$\nu \ll \omega$ (低温プラズマ近似) $\Rightarrow Z \approx 0$

ω_H : Plasma angular frequency

ω_H : Gyro angular frequency

ν : Electron collision frequency



$$n^2 = 1 - X$$

実部：屈折率

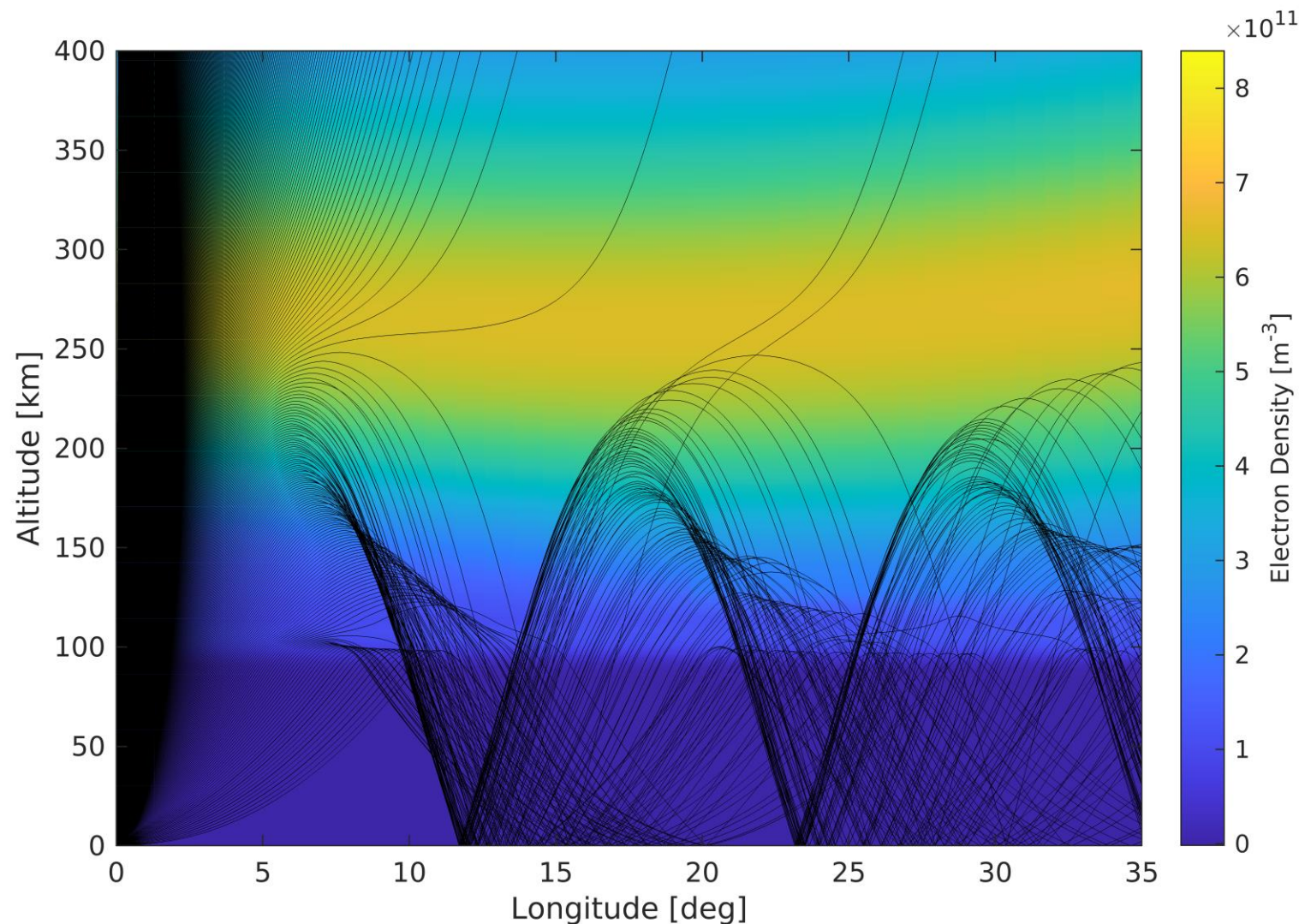
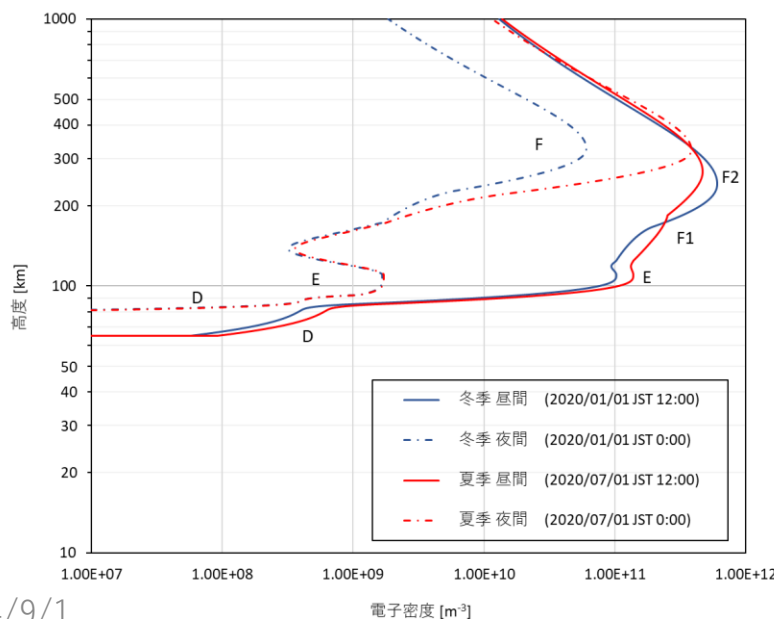
虚部：損失 $\rightarrow$ 電離層吸収

屈折率と電離層伝搬

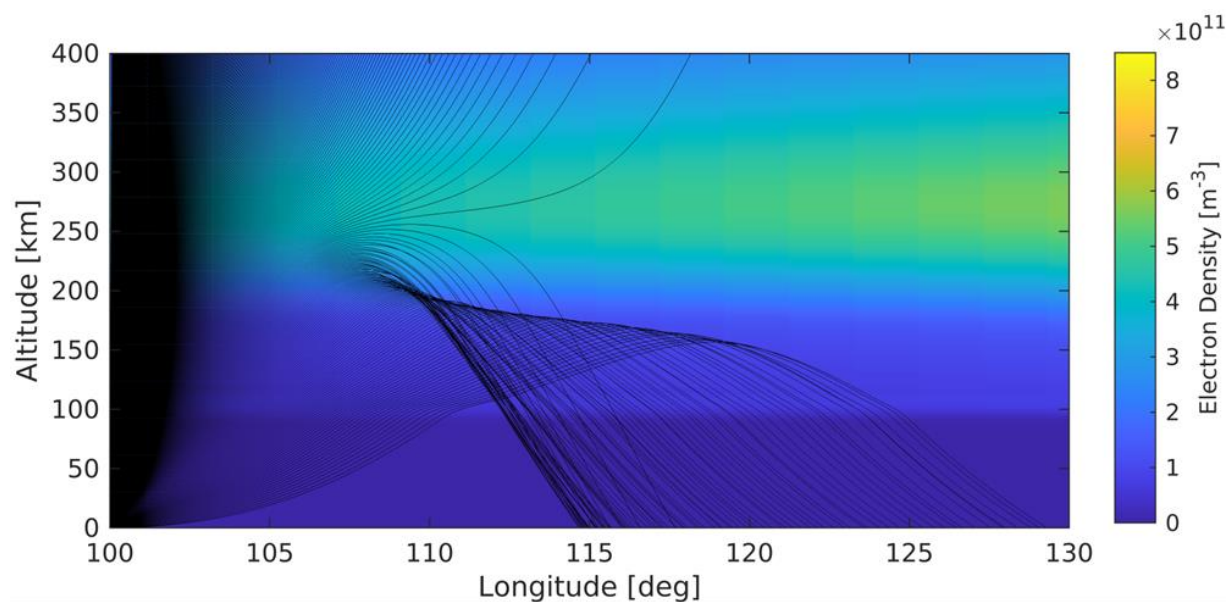
$$n = \sqrt{1 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e} \cdot \frac{N_e}{f^2}}$$

定数成分

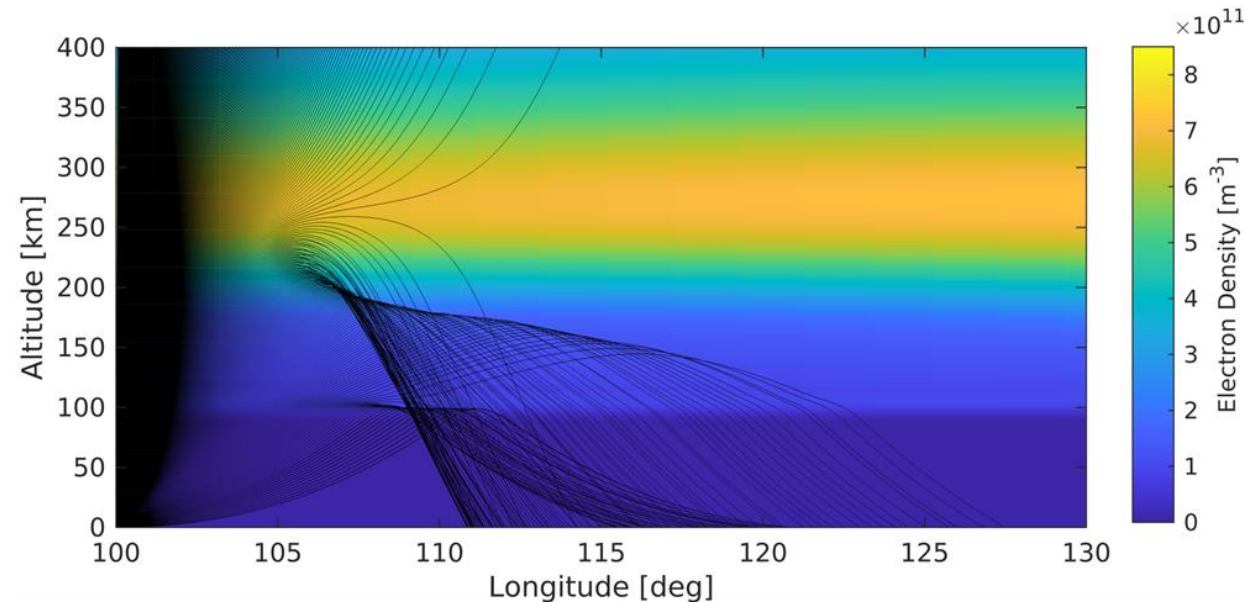
プラズマ大気の屈折率: n 真空の誘電率: ϵ_0 電子の電荷量: e [C]
 電子密度: N_e [m^{-3}] 電子の質量: m_e [kg] 周波数: f [Hz]



伝搬経路の変化



(a) 14MHz, Tx: 0°N 100°E, UTC 2017/08/01 00:00 (IRI-2016)



(b) 14MHz, Tx: 0°N 100°E, UTC 2017/08/01 01:00 (IRI-2016)

- 鉛直上向き方向のTEC (VTEC: Vertical TEC) がIRI-2016モデルに従って変動するシミュレータを作成
- 時間変化に伴う伝搬経路及び受信電力の変化を計算

減衰(電離層吸収)

- 磁場の影響を無視すると、減衰係数 α はAppleton-Hartreeの式から、実効衝突周波数 ν_e を用いて、次式で表せる。

$$E = E_0 \exp(-\int \alpha ds)$$

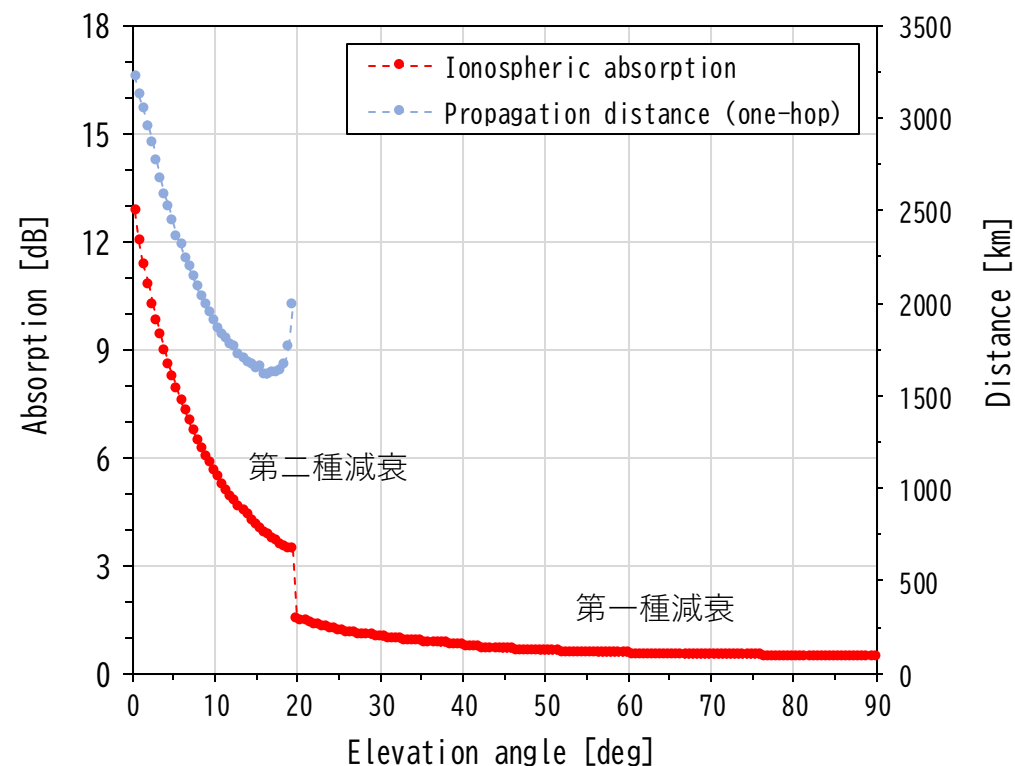
$$\alpha = \frac{1}{2c} \cdot \frac{e^2}{\epsilon_0 m_e} \cdot \frac{\nu_e N_e}{(\omega^2 + \nu_e^2)n}$$

このとき、伝搬経路 L 全体の減衰量は、

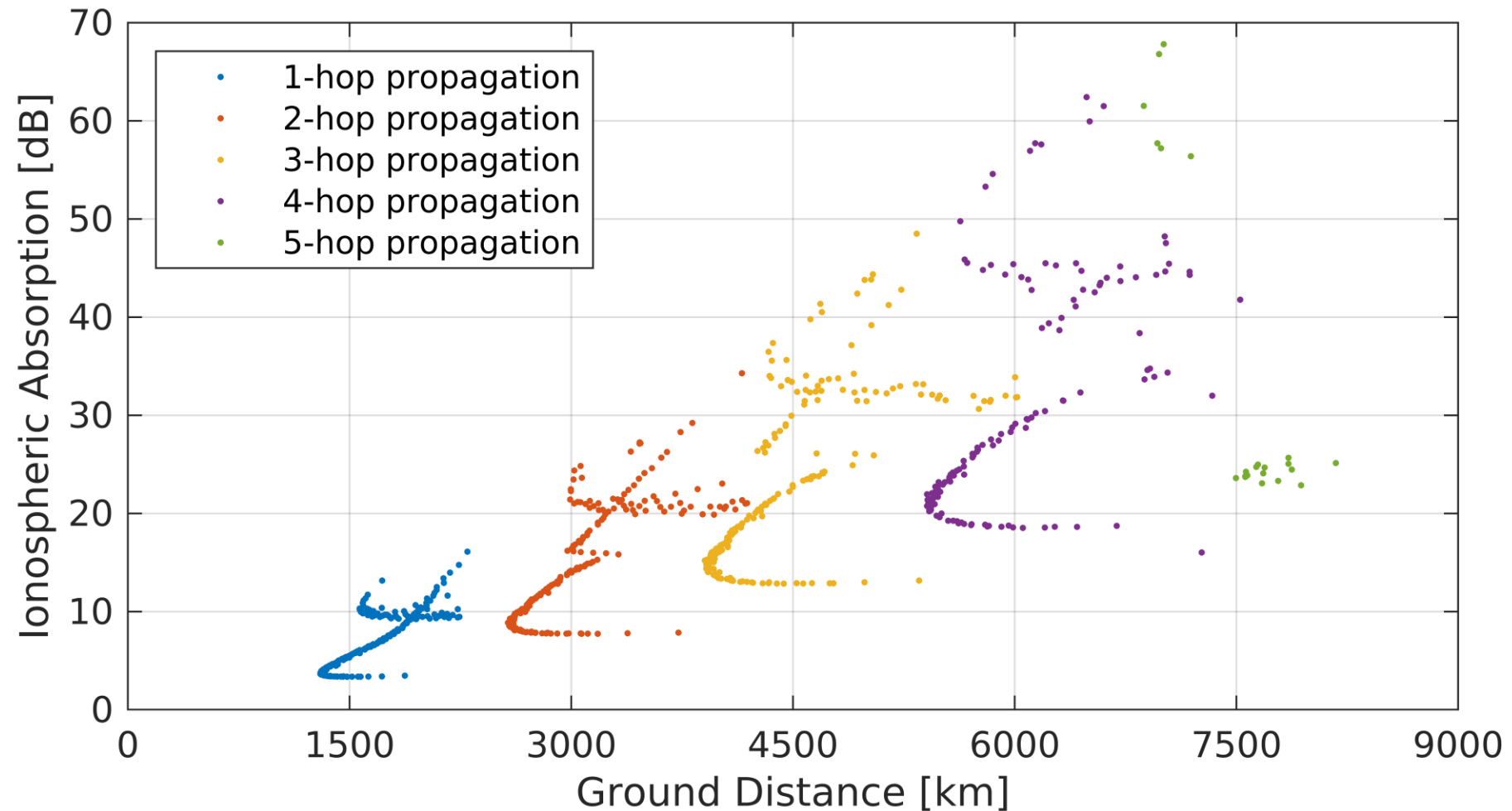
$$A = 20 \log_{10} \left(\frac{E_0}{E} \right) = -20 \log_{10} \exp \left(\int_L \alpha ds \right) \quad [\text{dB}]$$

- 実効衝突周波数 ν_e は、コールドプラズマ仮定下では、Nicoletの式より、中性粒子数密度 N_n 、電子温度 T_e を用いて、次式で表せる。

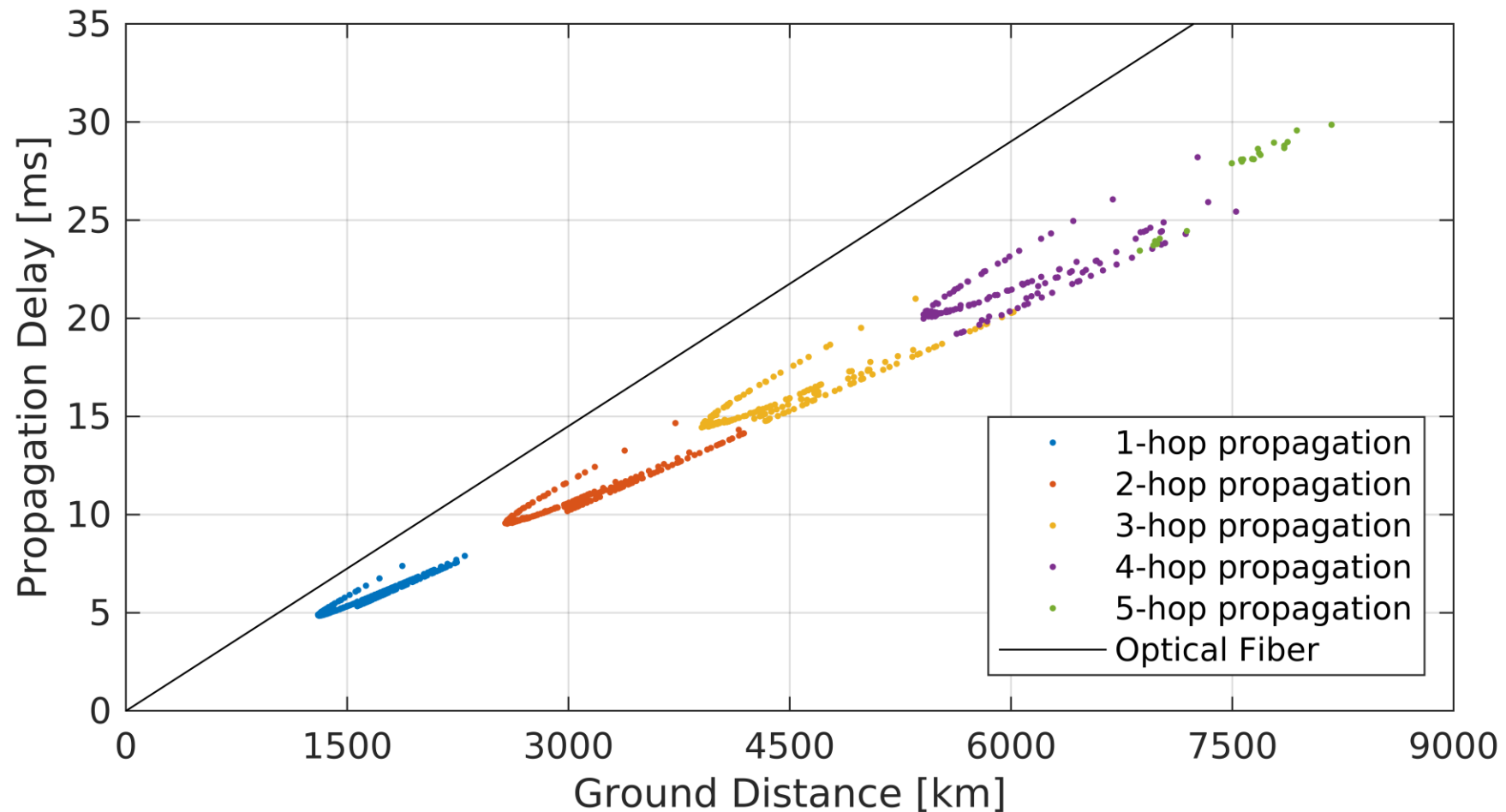
$$\nu_e = 5.4 \times 10^{-16} N_n \sqrt{T_e}$$



Ionospheric Absorption with k-hop propagation (14MHz)



Propagation Delay with k-hop propagation (14MHz)



受信電力(瞬時電力)

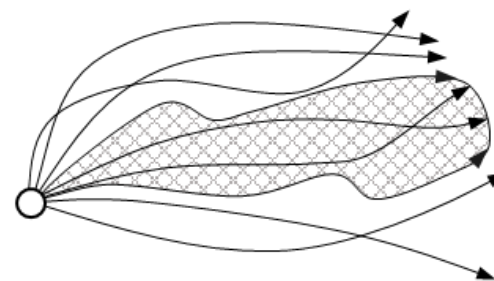
地上に到達した電波のうち実効面積 A_e のアンテナが取り出せる最大の電力 P_{A_e} は、

$$P_{A_e} = \frac{P_t}{4\pi} \int_{\theta} \int_{\phi} G_t(\theta, \phi) \cdot \sin\theta d\phi d\theta$$

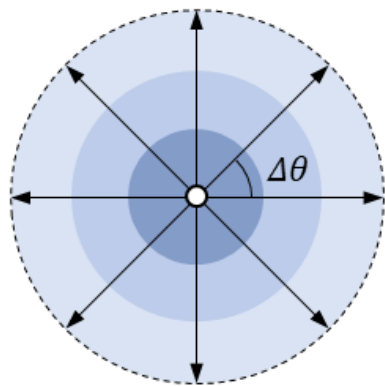
$$P_r = 10 \log_{10} P_{A_e} - L_i - L_g$$

ただし、 P_t は送信電力、 G_t は送信アンテナのゲイン、 θ は仰角、 ϕ は方位角、 L_i は電離層吸収損、 L_g は大地反射損
複数経路からの電力の合成は、

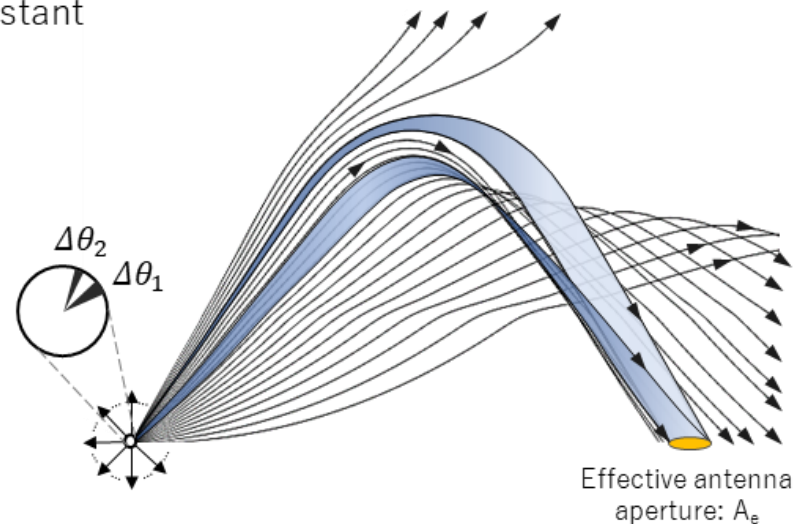
$$P_r = \frac{1}{Z} \left| \sum_k V_{ek} e^{j\phi_k} \right|^2$$



(a) Closed domain that the line of electric force is constant



(b) PFD with uniform refractive index



(c) PFD with non-uniform refractive index

受信電力の合成

$$P_C = \text{Re}\{\dot{V}\}^2 + \text{Im}\{\dot{V}\}^2$$

$$= \frac{1}{2 \cdot Z} \left[\{|\dot{V}_1| \cos \phi_1 + \dots + |\dot{V}_k| \cos \phi_k\}^2 + \{|\dot{V}_1| \sin \phi_1 + \dots + |\dot{V}_k| \sin \phi_k\}^2 \right]$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \lim_{X \rightarrow 0} P_C = \frac{1}{2R} \left[\{|\dot{V}_1| \cos \phi_1 + \dots + |\dot{V}_k| \cos \phi_k\}^2 + \{|\dot{V}_1| \sin \phi_1 + \dots + |\dot{V}_k| \sin \phi_k\}^2 \right] \\ \lim_{R \rightarrow 0} P_C = 0 \end{array} \right.$$

P_C : Complex power

$\text{Re}\{P_C\}$: Active power

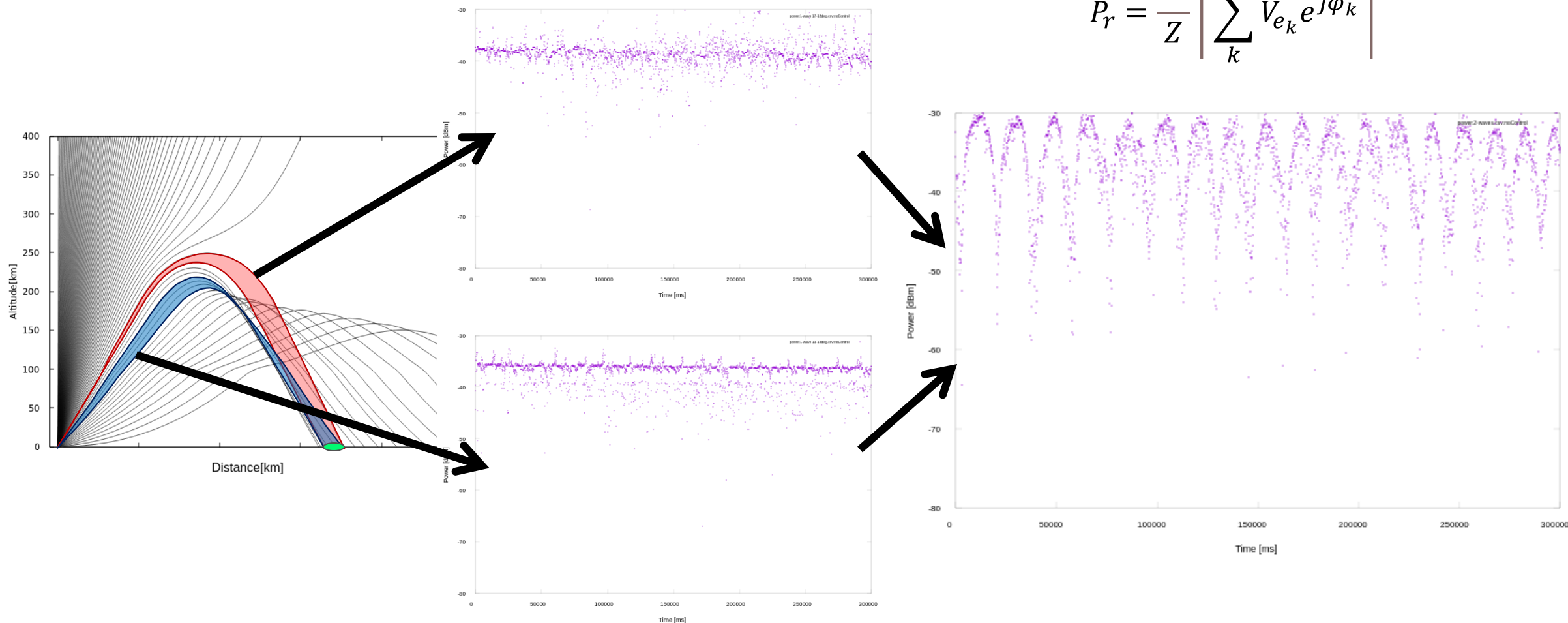
V_k : Voltage of received waves

$|P_C|$: Apparent power

$\text{Im}\{P_C\}$: Reactive power

ϕ_k : Phase of received waves

受信電力の合成



電離層フェージングの分類

- 干渉性フェージング

伝搬経路が時間的に様々に変化し、干渉状態に変化が生じることが原因

- 偏波性フェージング

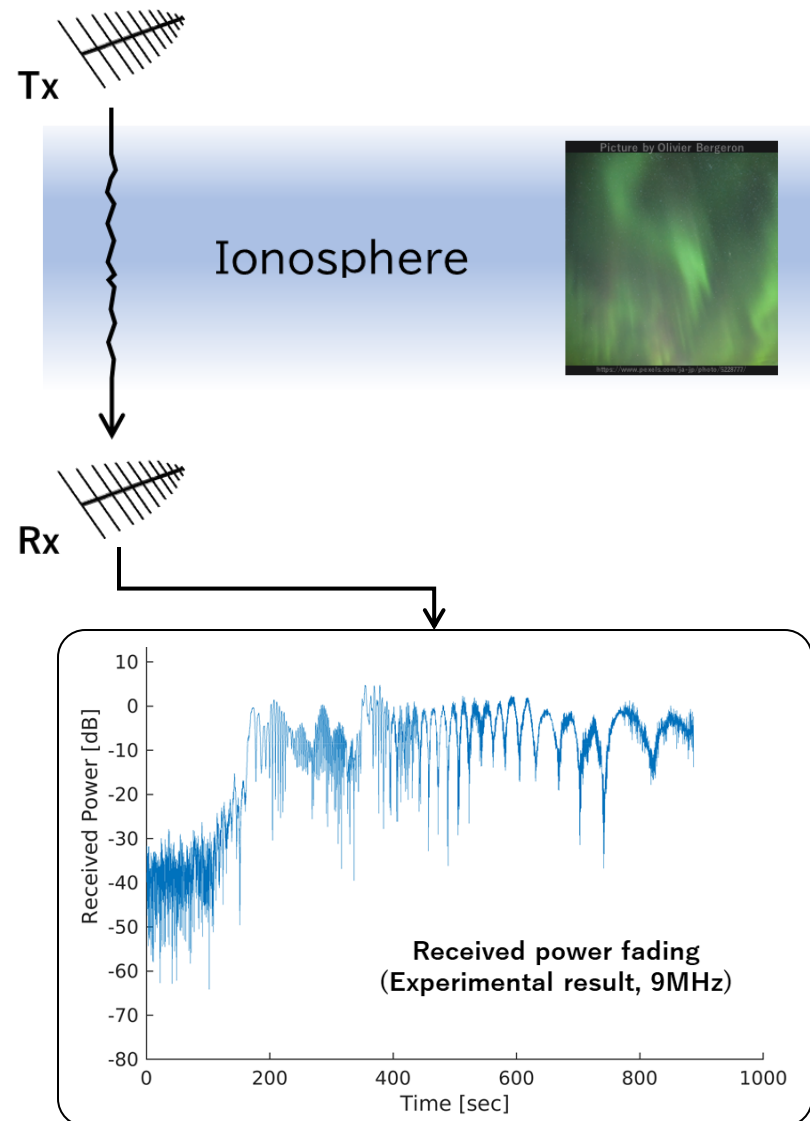
地磁気の影響を受けて偏波面が回転し、偏波にずれが生じることが原因

- 吸収性フェージング

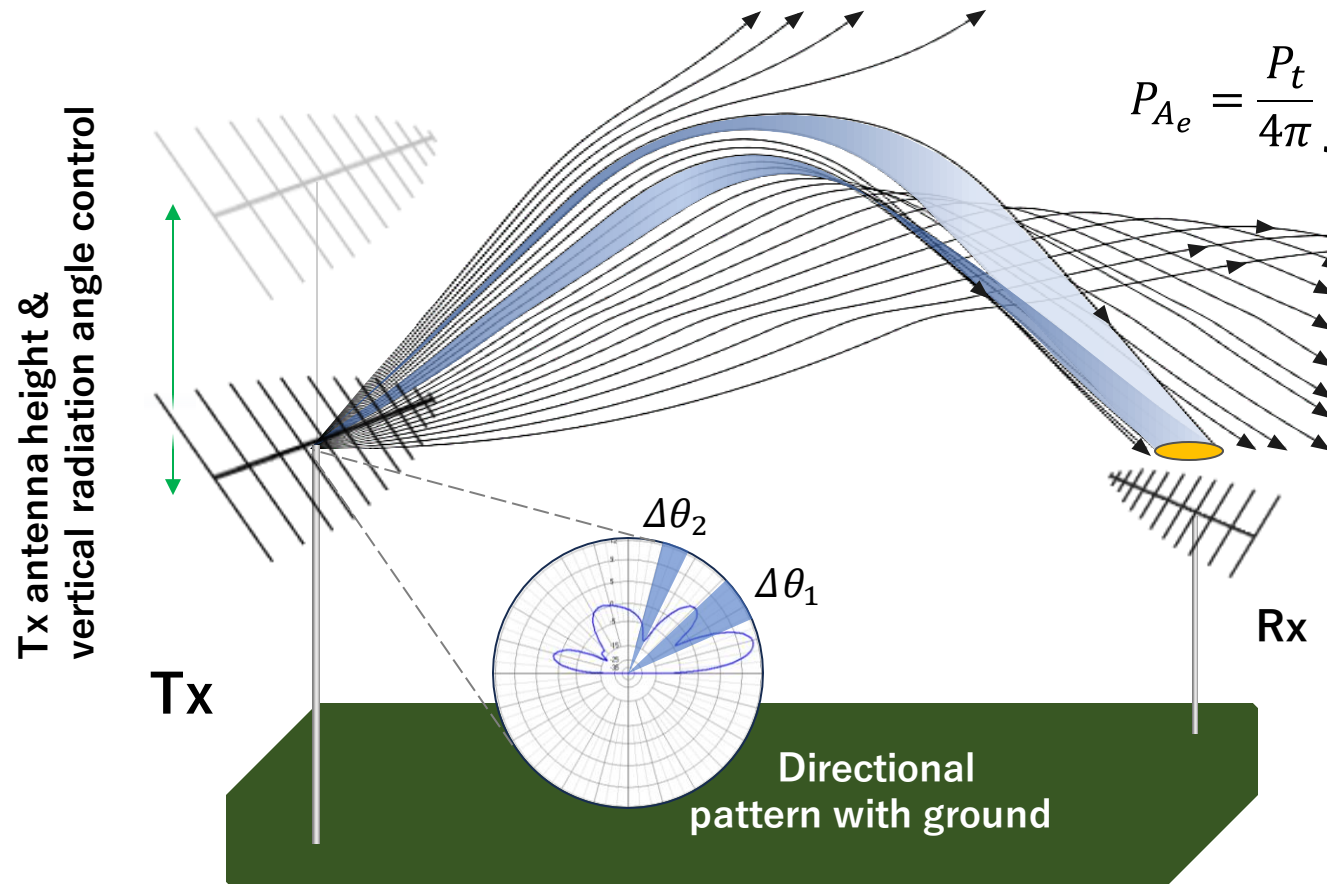
伝搬経路が時間的に様々に変化し、電離層吸収の量が変わることが原因

- 跳躍性フェージング

伝搬経路が時間的に様々に変化し、MUF近傍の電波が電離層を突き抜けたり反射したりすることが原因



アンテナ打ち上げ角制御によるフェージング抑制方式

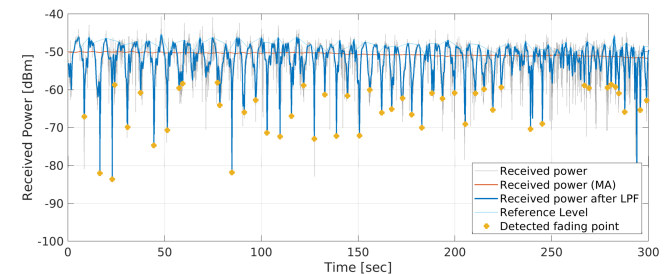


$$P_{A_e} = \frac{P_t}{4\pi} \int_{\theta} \int_{\phi} G_t(\theta, \phi) \cdot \sin\theta d\phi d\theta$$

経路毎に電力を計算

複数経路の重畳

$$P_r = \frac{1}{Z} \left| \sum_k V_{e_k} e^{j\phi_k} \right|^2$$

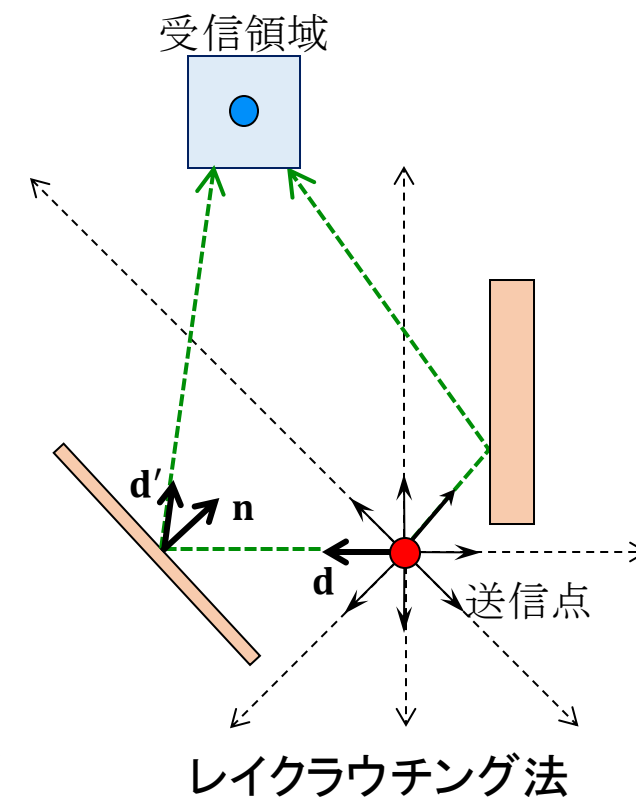
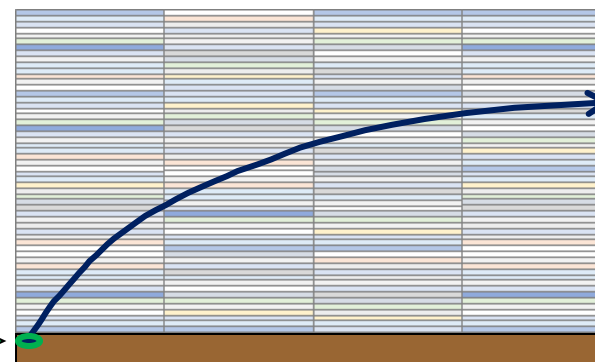
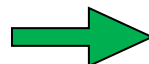


Ray-tracing method (光線追跡法)

- 計算領域を微小空間に分割
→ 各微小空間にそれぞれ屈折率を割り当てる
- 微小空間の境界面でスネルの法則を適用
→ 屈折・反射方向ベクトルを得る
→ 終了条件を満たすまで反復

$$\mathbf{d}' = \frac{n_i}{n_r} \left(\mathbf{n} \cdot \left(\sqrt{r} - (\mathbf{n} \cdot \mathbf{d}) \right) + \mathbf{d} \right)$$

送信点

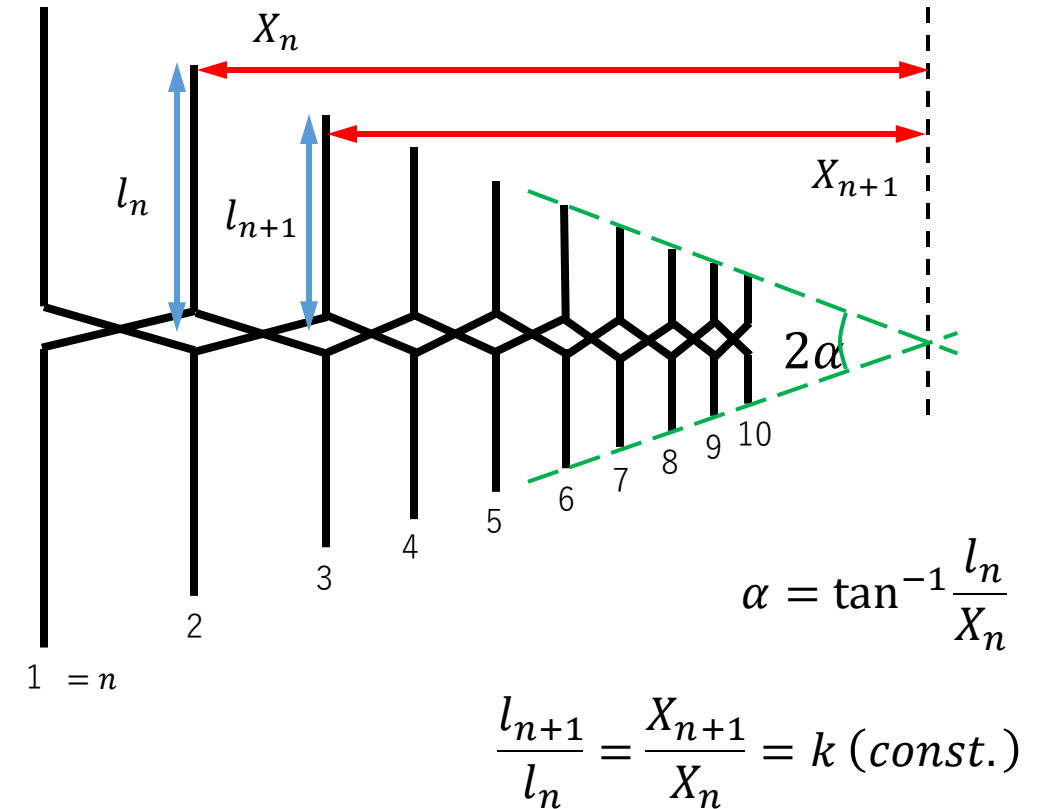
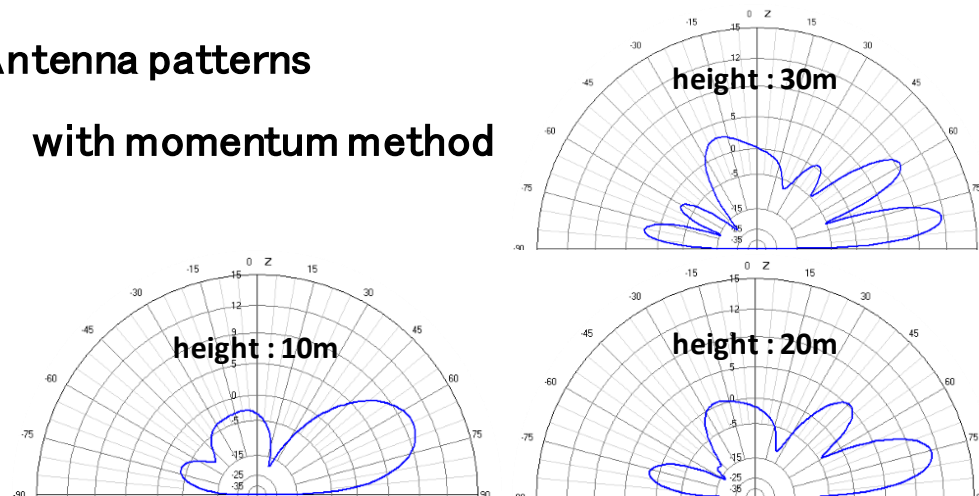


Directional pattern analysis

LogPeriodic Antenna

- Wideband and directional antenna

Antenna patterns
with momentum method



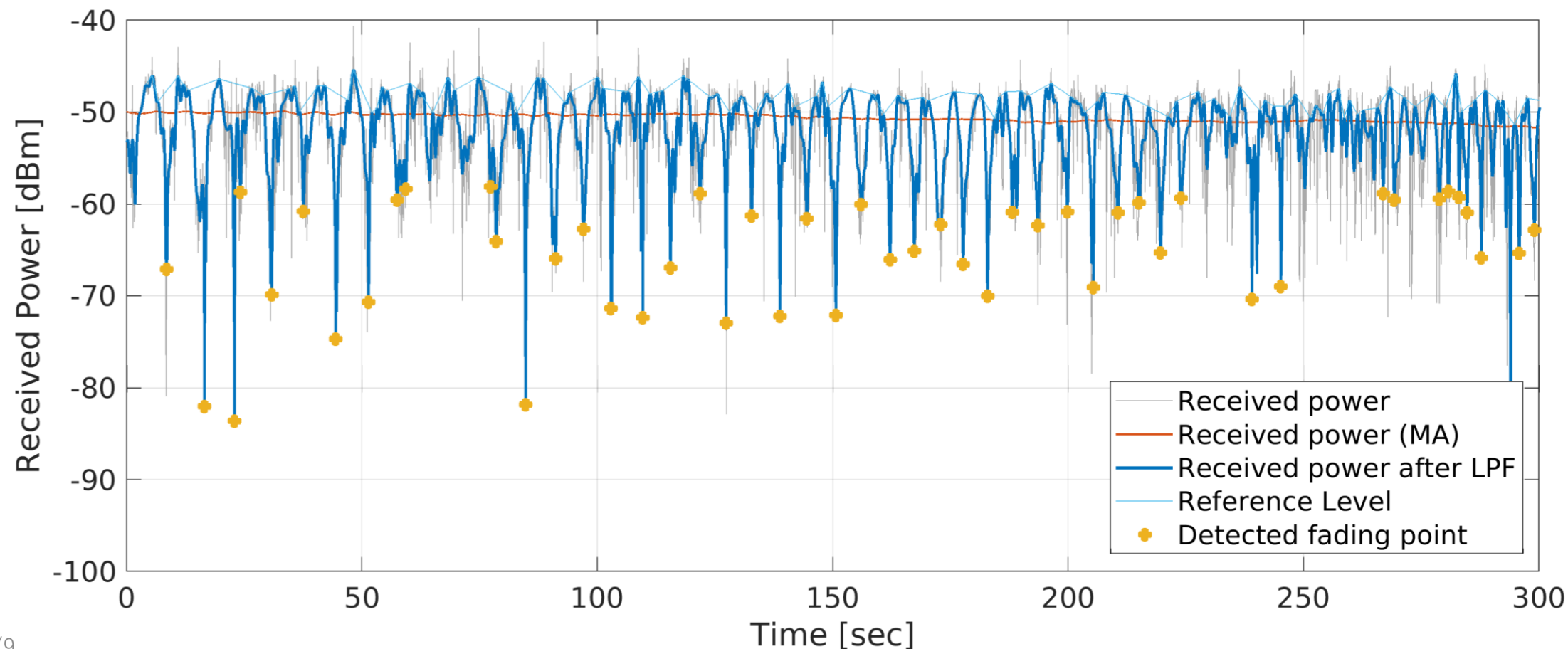
Received power result by simulation

14MHz, 2017/08/01 00:00-01:00 (UTC)

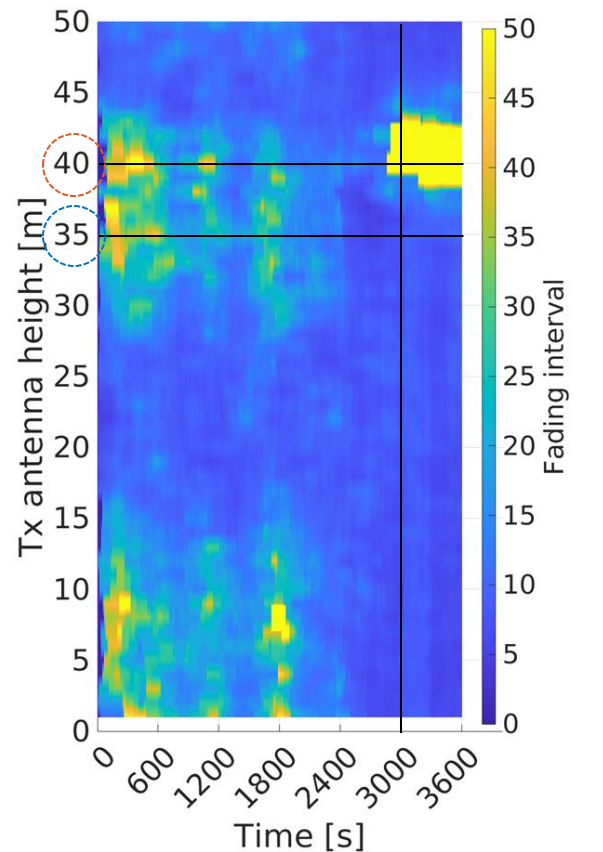
Tx: 0°N 100°E Isotropic antenna (h:1m, Gain:0dBi)

Pt : 43dBm (100W)

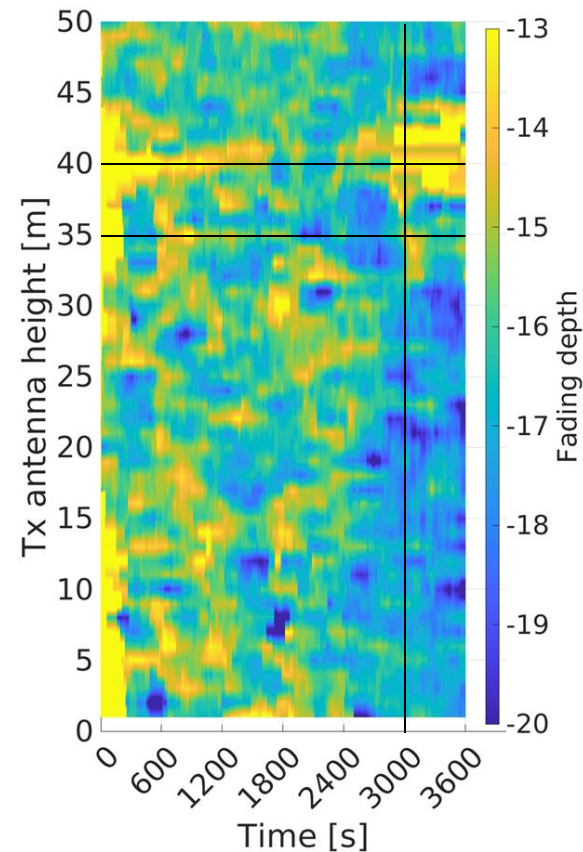
Rx: 0°N 115°E Isotropic antenna (h:0m, Gain:10dBi)



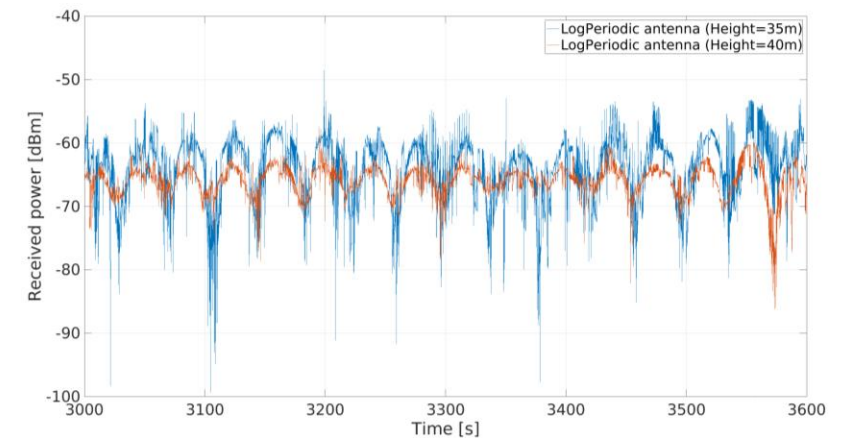
Relationship between Antenna height and Fading depth/interval



(a) Fading interval (MA)



(b) Fading depth (MA)



14MHz, 2017/08/01 00:00–01:00 (UTC)

Pt : 43dBm (100W)

Tx: 0°N 150°E LogPeriodic antenna

Rx: 0°N 165°E Isotropic antenna

RESEARCH on F Layer Profile employing FT8 communication



Current our prediction problem: evaluation of propagation & hop distance

FT8を活用した電離層状態推定は、現状は伝搬経路（の地表面への射影）を基に評価を行っているため、高さ方向の情報が十分とはいえない。（実際の電波が地上付近を通過しているときにも評価対象としてしまっている）

→ ホップ(反射位置)を考慮した評価とする必要があると考えている → ホップ数・距離をある程度見積もる必要がある

[1]

一般社団法人 電子情報通信学会
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

信学技報
IEICE Technical Report
IN2023-8(2023-45)

現状

FT8を用いたリアルタイムグローバル電離層活動検出

大内 颯 吉井 一駿 パン ジェニー 嶋本 薫

早稲田大学基幹理工学研究科 〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1

E-mail: hayate0312_1103@akane.waseda.jp, kazutoshi@suou.waseda.jp,
zhenni.pan@aoni.waseda.jp, shima@waseda.jp

あらまし 電磁波の一種である短波帯は中継を要せずに地球の裏側まで電波を届けられるという利点がある。それは短波が電離層という地球を球状に覆っている層と地表とを反射しながら伝搬していく性質を有するからであるが、この電離層は時間によって変化するほか突発的に生じる現象もあるため、現在の電離層の状態を正確に予測することは困難である。電離層のモデルとしてIRIが知られているが、あくまで理論的なものであり、太陽活動が活発化すると実際の電離層状況は変化してしまう。このため、本論文では無線通信方式の一つであるFT8を用いて、実際に伝搬が成立している通信データの観察という新たな観点から電離層をとらえる研究を行った。さらに理論的なモデルと実測したデータとを比較し、電離層伝搬に適した条件や両者の整合性を検証した。

キーワード FT8, 電離層, 電波伝搬, 短波, 電離層伝搬, スポラディックE層,

Real-time Global Ionospheric Activity Detection Using FT8

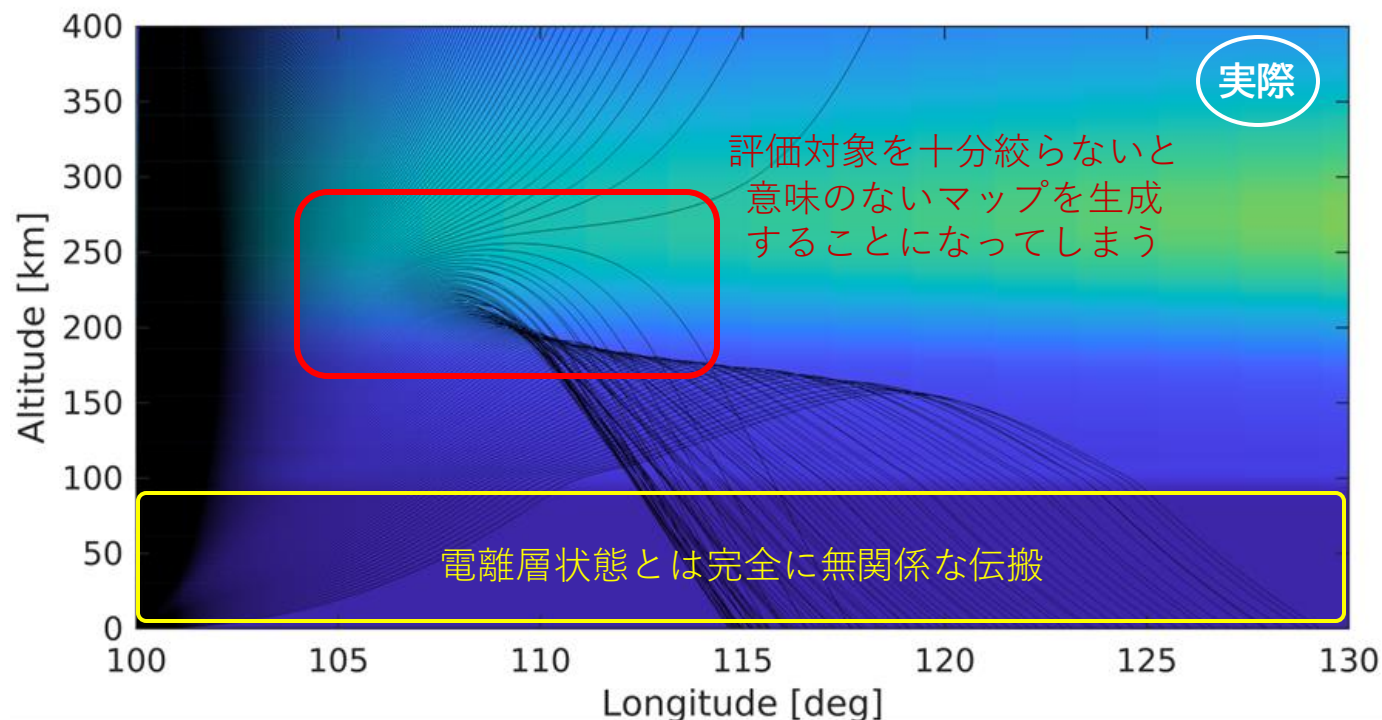
Hayate OUCHI Kazutoshi YOSHII Zhenni PAN Shigeru SHIMAMOTO

The Department of Computer Science and Communication Engineering, Waseda University
3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-8555 Japan

E-mail: hayate0312_1103@akane.waseda.jp, kazutoshi@suou.waseda.jp,
zhenni.pan@aoni.waseda.jp, shima@waseda.jp

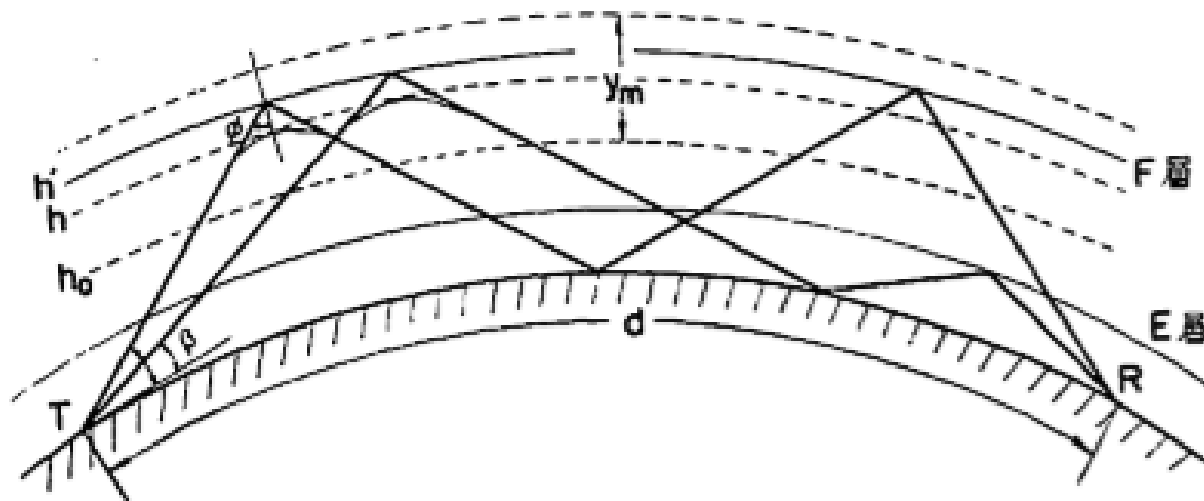
Abstract The high frequency band, which is a type of electromagnetic wave, has the advantage of being able to transmit radio waves to the far side of the Earth without the need for relays. This is because high frequency waves propagate through the ionosphere, a layer that covers the Earth in a spherical shape and reflects off the Earth's surface. However, predicting the current state of the ionosphere accurately is difficult because it changes over time and due to sudden phenomena that occur unexpectedly. Currently, the International Reference Ionosphere (IRI) is known as an empirical standard model of the ionosphere. However, actual ionospheric conditions change when solar activity becomes more active. For this reason, this paper uses FT8, a wireless communication method, to study the ionosphere from a new perspective of actual communication data propagated worldwide. Furthermore, the measured data is compared with the theoretical model to verify the requirements for ionospheric propagation and to ensure consistency between them.

Keywords FT8, Ionosphere, Radio propagation, High frequency, Ionospheric propagation, Sporadic E layer,



Categorized propagation mode by reflection layers

[2] 一之瀬 優, 山岡 誠, “電子計算機によるMUF, LUFおよび短波空間波電界強度の計算法”, 情報通信研究機構研究報告, 1971, 17 巻, 93 号, p. 480-498, 公開日 2019/08/31, Online ISSN 2433-6009, Print ISSN 2187-767X, https://doi.org/10.24812/nictkenkyuhoukoku.17.93_480



第1図 2F および混合モードの幾何学的関係

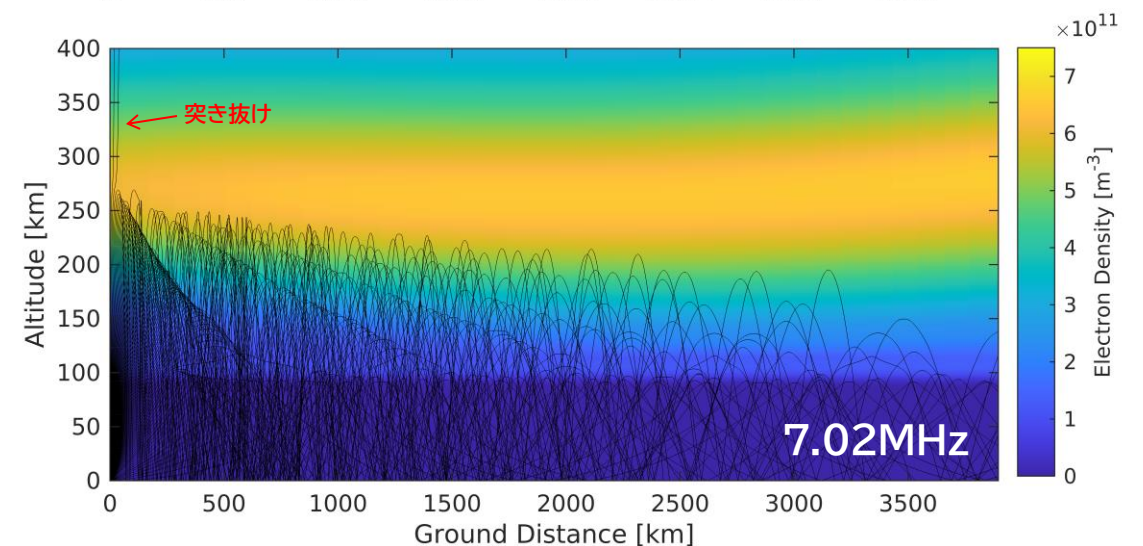
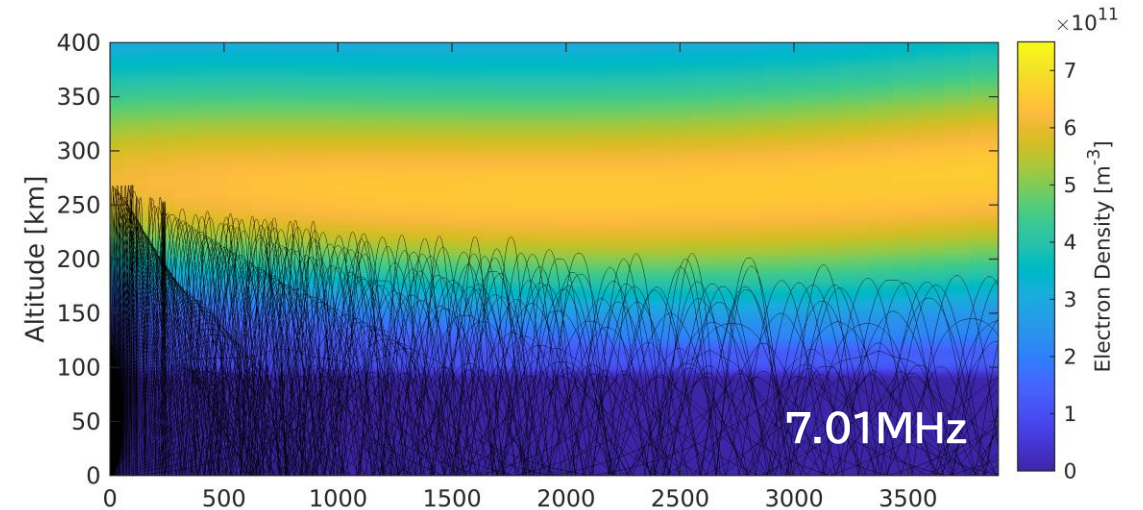
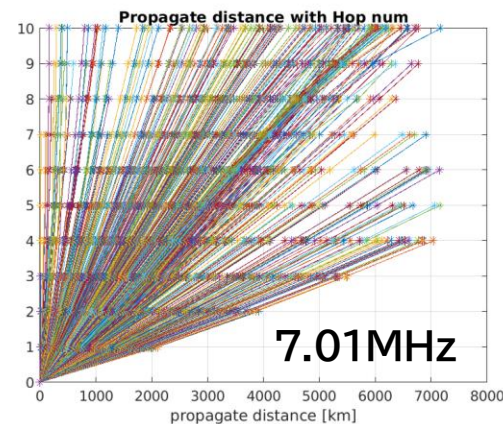
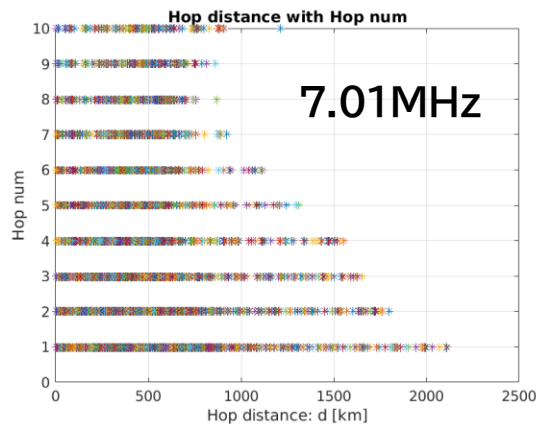
第3表 大圏コースによる伝搬モード

大圏コース	予想される伝搬モード				
0～2000 km	1E	1F	2F		
2000～4000 km	2E	1F	2F	1E+1F	
4000～6000 km	3E	2F	3F	1E+1F	2E+1F
6000～8000 km	4E	2F	3F	1E+2F	2E+1F
8000～10000 km		3F	4F	1E+2F	2E+2F

- この伝搬モード予測は，論文中でいきなり登場していて十分に理解していないので，もう少し情報を調べる必要がある．
- シミュレーション結果とおおよそ一致しているようなので，妥当な予測値ではあると考えている．

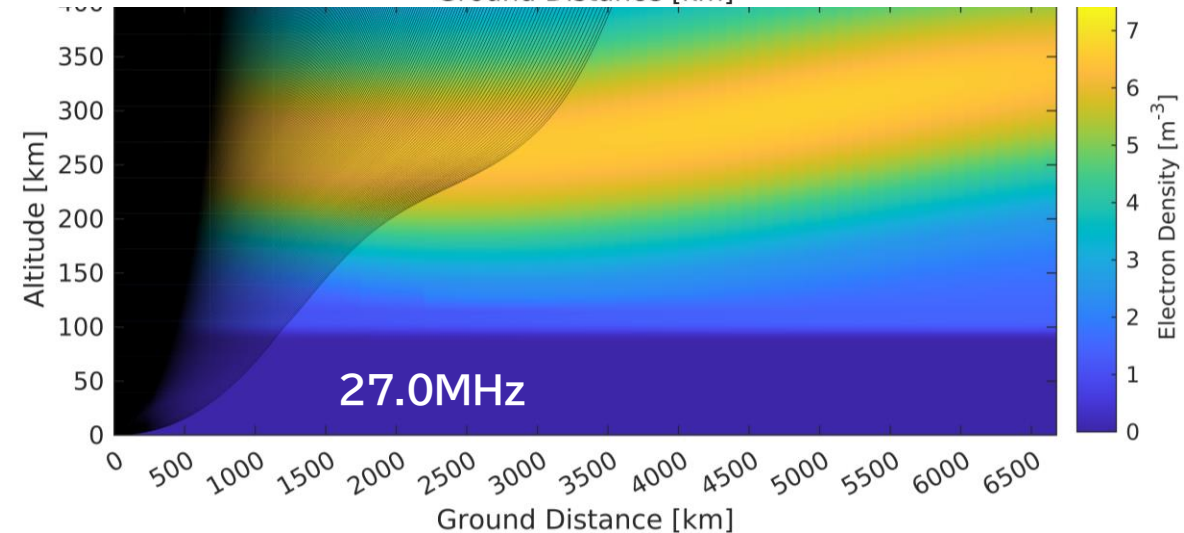
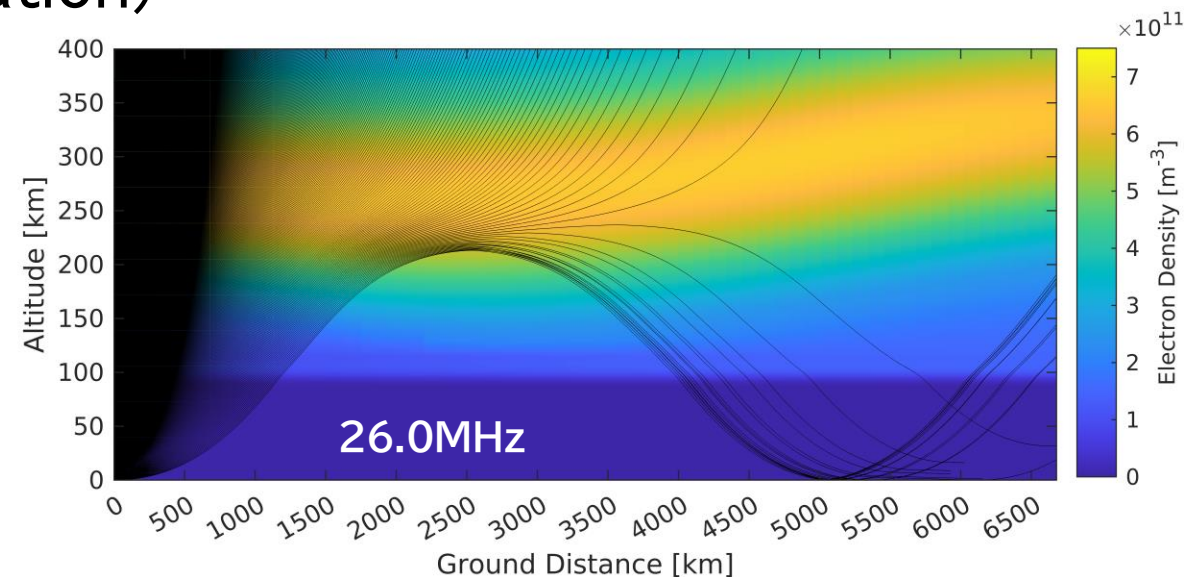
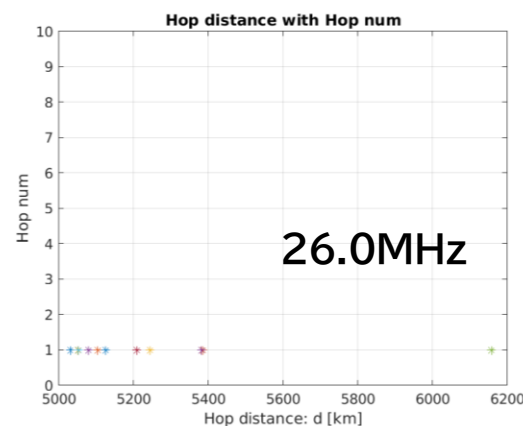
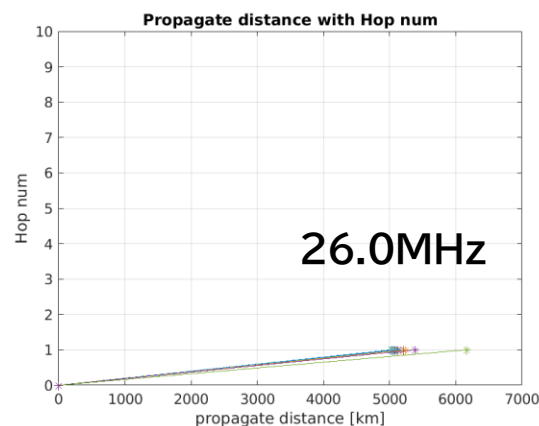
Propagation mode on f_0F2 (simulation)

- 適当な電子密度プロファイルに対して f_0F2 (F2層臨界周波数: 鉛直上側に電波を発射した場合に反射する周波数)を探索
- f_0F2 近傍の周波数で伝搬モードの様子をみた



Propagation mode on MUF (simulation)

- MUF は通常は通信方式に応じた所要SNRで決定するが、今回は伝搬可能性で判定
- 適当な電子密度プロファイルに対して MUF を探索
- MUF 近傍の周波数で伝搬モードの様子をみた

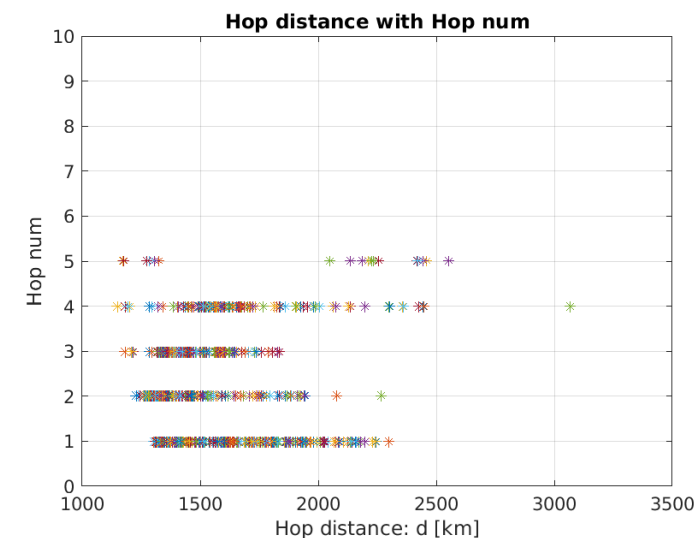
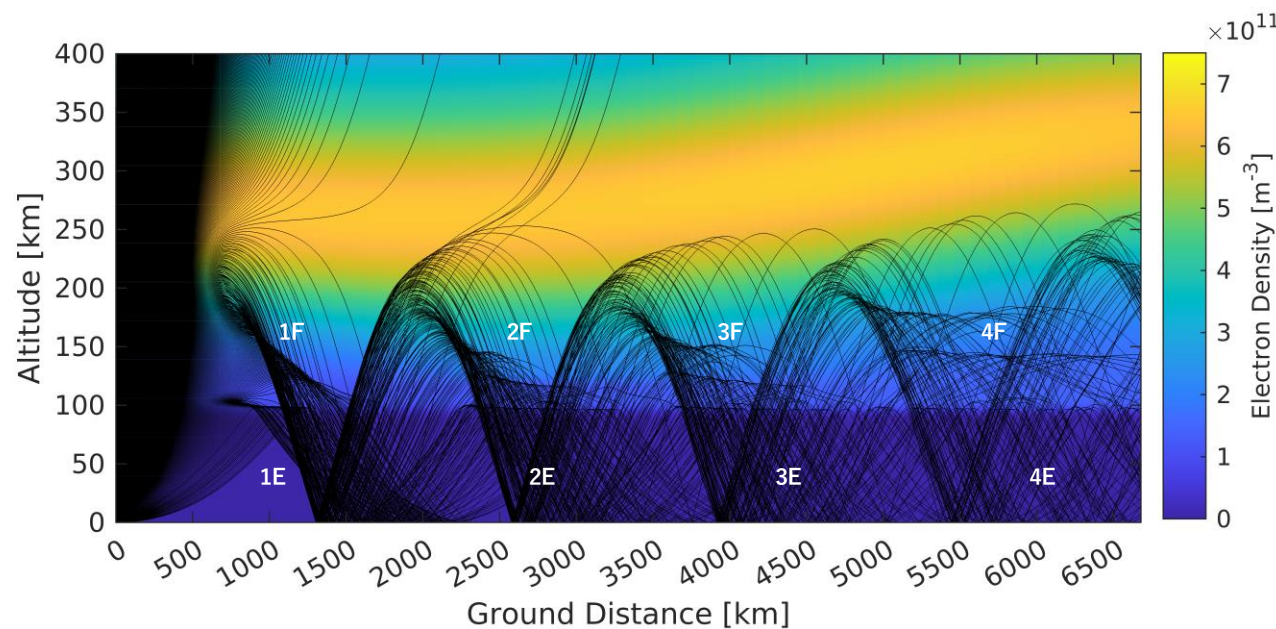
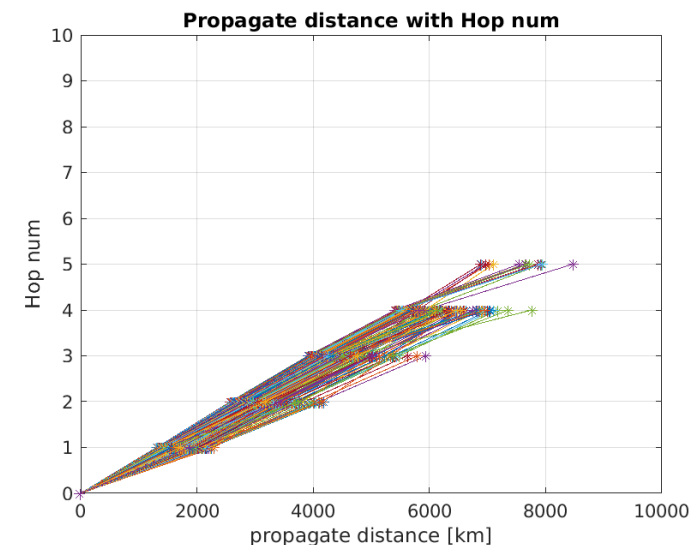


Propagation mode on another situation (simulation)

- 適当な電子密度プロファイルに対して
その他の周波数で伝搬シミュレーション
- 14MHzで伝搬モードの様子をみた

[2] 第3表 大圏コースによる伝搬モード

大圏コース	予想される伝搬モード			
0~ 2000 km	1 E	1 F	2 F	
2000~ 4000 km	2 E	1 F	2 F	1 E+1 F
4000~ 6000 km	3 E	2 F	3 F	1 E+1 F 2 E+1 F
6000~ 8000 km	4 E	2 F	3 F	1 E+2 F 2 E+1 F
8000~10000 km		3 F	4 F	1 E+2 F 2 E+2 F

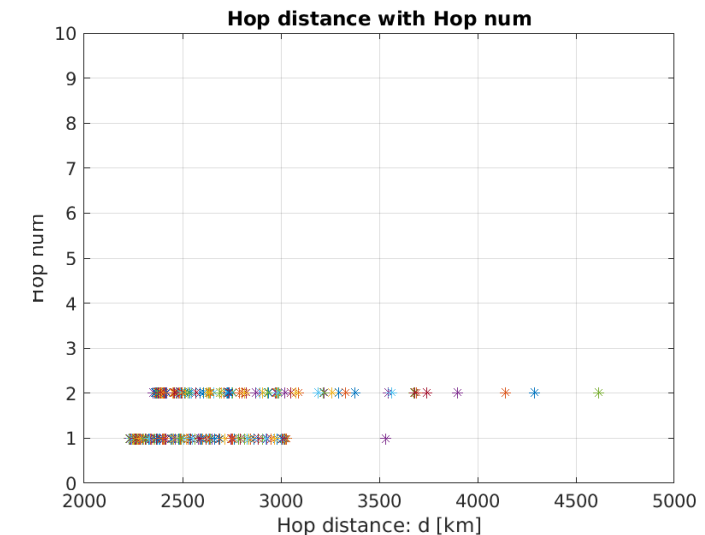
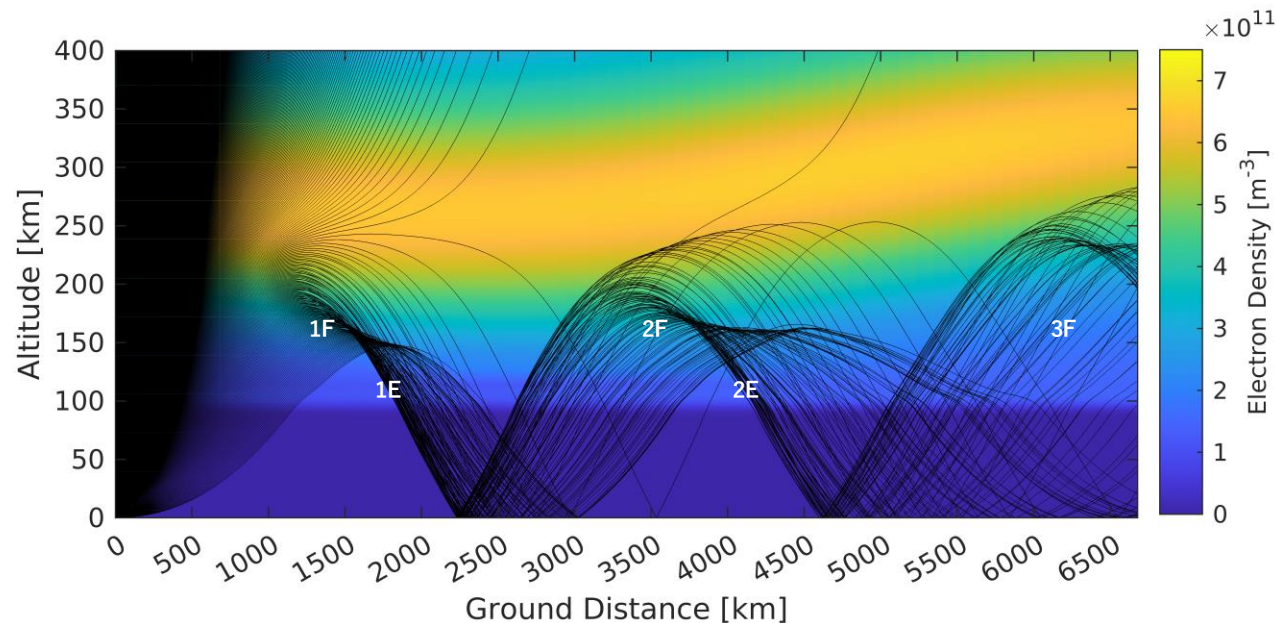
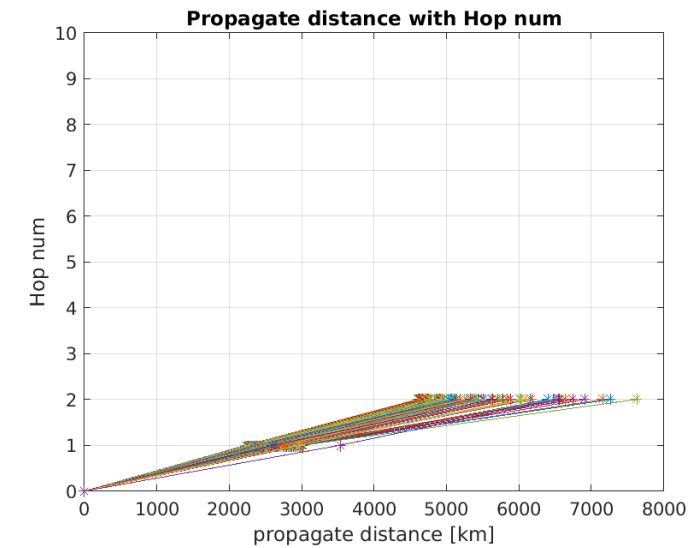


Propagation mode on another situation (simulation)

- 適当な電子密度プロファイルに対して
その他の周波数で伝搬シミュレーション
- 20MHzで伝搬モードの様子をみた

[2] 第3表 大圏コースによる伝搬モード

大圏コース	予想される伝搬モード				
0~ 2000 km	1E	1F	2F		
2000~ 4000 km	2E	1F	2F	1E+1F	
4000~ 6000 km	3E	2F	3F	1E+1F	2E+1F
6000~ 8000 km	4E	2F	3F	1E+2F	2E+1F
8000~10000 km		3F	4F	1E+2F	2E+2F



Purpose

Create a comprehensive map of

ionospheric conditions
+
shortwave communication conditions

Approach

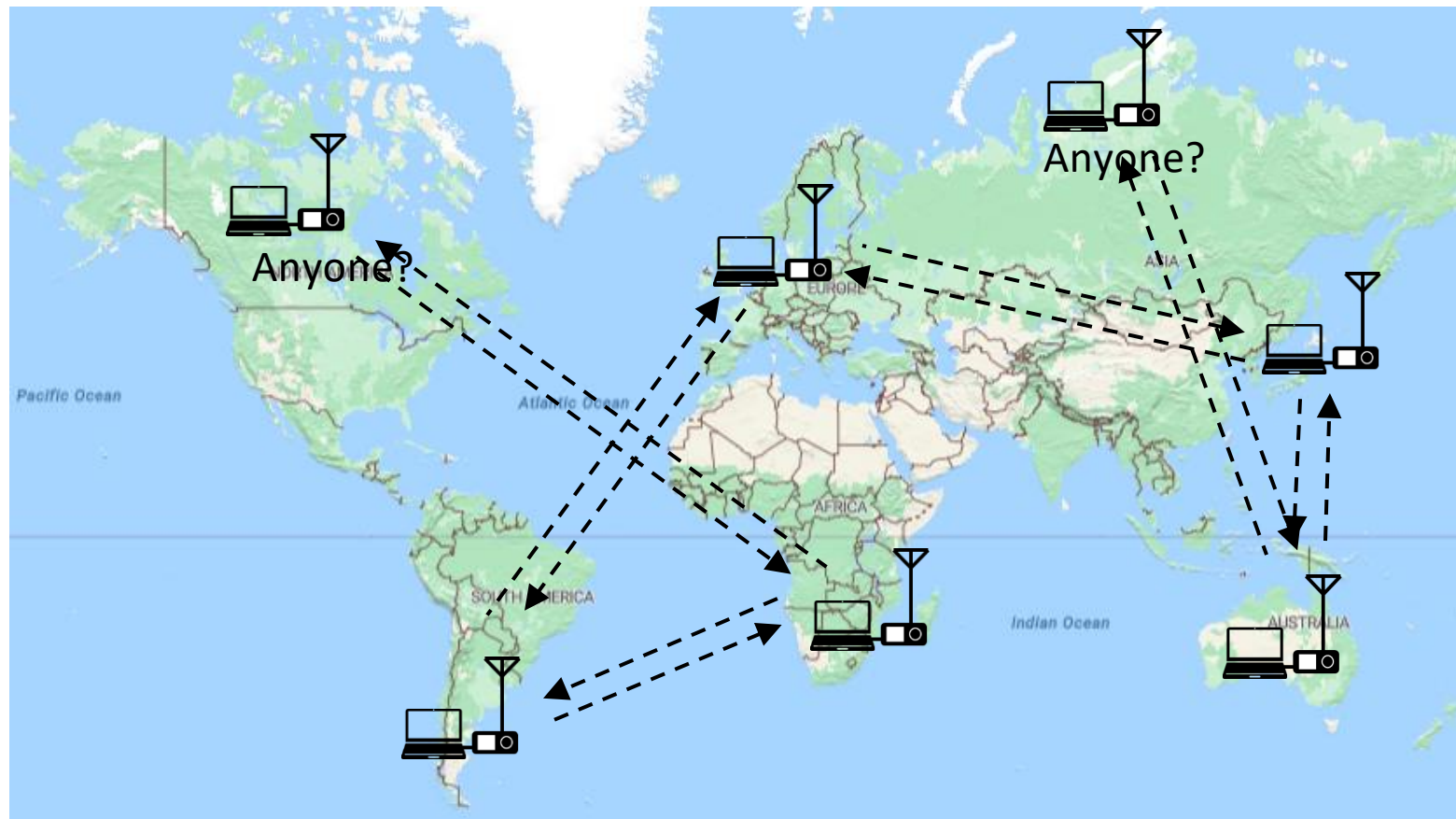
- Develop a system to observe FT8 and to collect data from all over the world
- Create heatmaps to visualize the real-time propagation status.

2. FT8 Communications

Real-time Ionospheric Propagation Estimation with FT8 data communication

FT8 Communications overview

FT8: A type of wireless communication mode that uses the HF band



Format of FT8 communications

Time	SNR	Δt	Δfreq	message
063900	11	1.3	746 ~	CQ YO6OGW KN26
063900	7	1.4	937 ~	PD5DLB UA3UBV RR73
063900	1	1.5	375 ~	R0QBB RK3BM R-11
063900	6	1.7	1070 ~	CQ SV1EAG KM18
063900	-5	1.1	1214 ~	R4FET RV6F LN14
063900	-1	1.0	1041 ~	F1FJR EK1KE -16
063900	-3	1.1	791 ~	CQ RA3AVR KO85

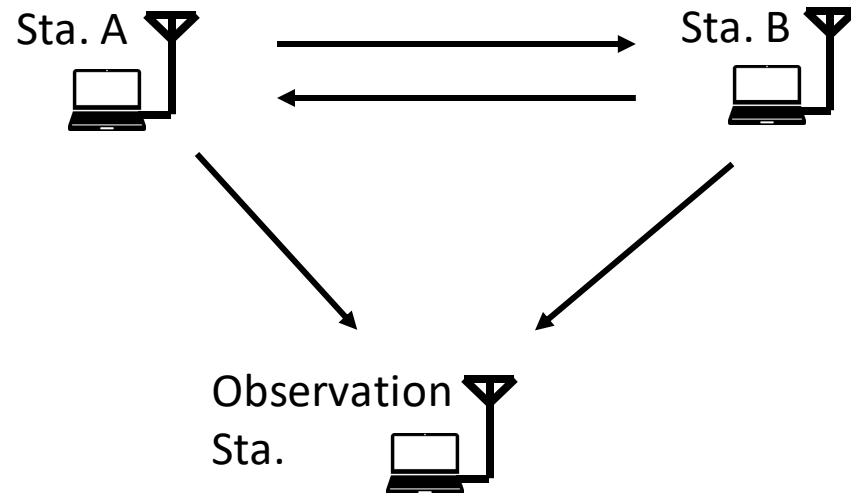
- time
- callsign
- grid locator
- SNR (Signal-to-Noise Ratio)

Able to estimate locations of TX/RX stations and its SNR

Interpretation of the collected data

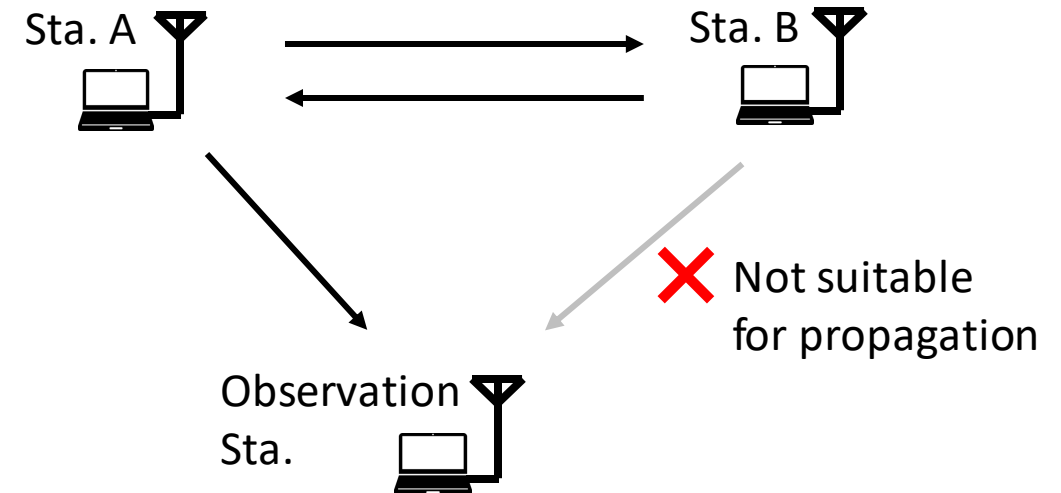
- Comms from **BOTH** stations

No.	time	freq	message
396	221005_083045	21.074	CQ JQ1FBT PM95
400	221005_083100	21.074	JQ1FBT BH3EHP -19
408	221005_083115	21.074	BH3EHP JQ1FBT R-07
414	221005_083130	21.074	JQ1FBT BH3EHP RR73
420	221005_083145	21.074	BH3EHP JQ1FBT 73

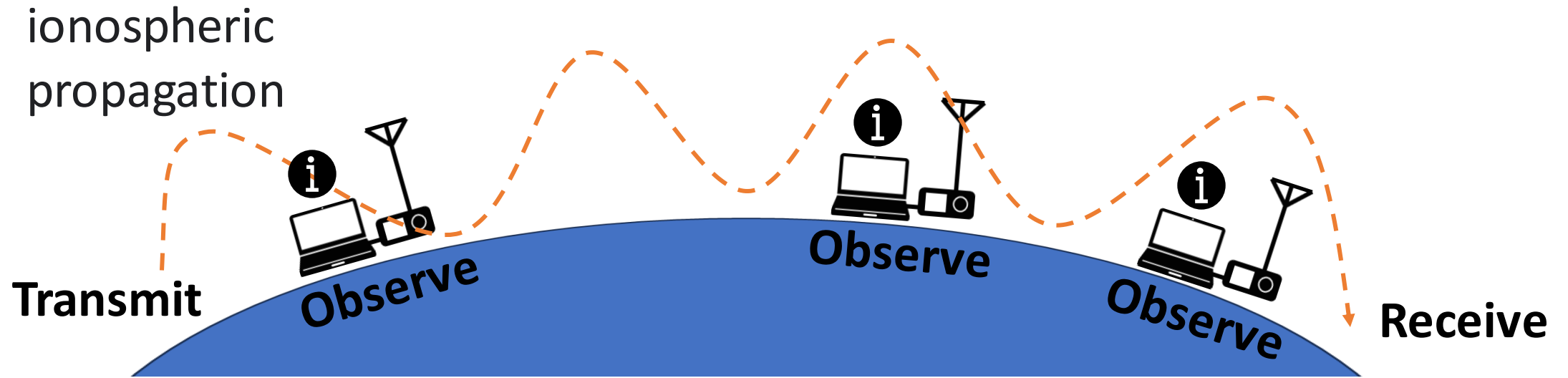


- Comms from **ONE** station

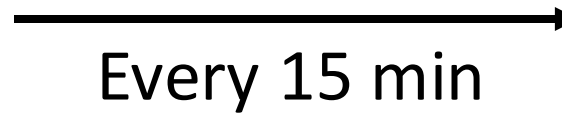
No.	time	freq	message
200	221005_082430	21.074	CQ BD3RK OM77
235	221005_082530	21.074	JF2RYX BD3RK R-16
252	221005_082600	21.074	JF2RYX BD3RK 73



Proposed System

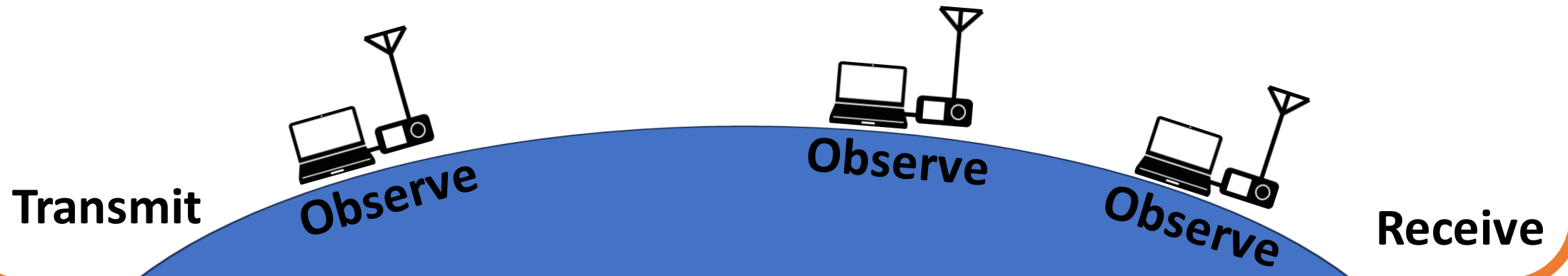


Every 15 sec



Proposed System

1) Observation



2) Collection

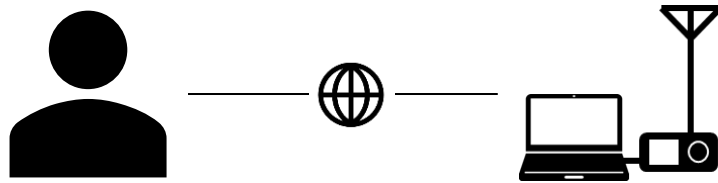


3) Analysis

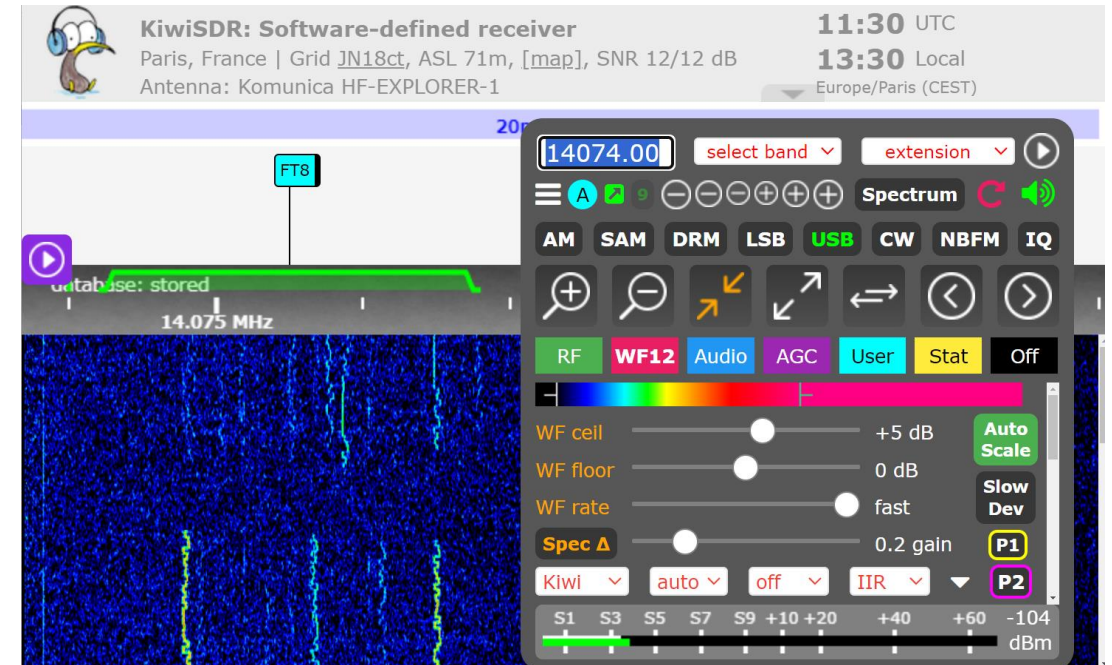


1) Observation

kiwiSDR: A website that allows remote control of radio stations



- frequency
- filter
 - packets of audio data
 - signal strength



Referred to 1.

1) Observation

kiwiSDR: A website that allow remote control of radio stations

- 800 stations online
- Real-time data
- Available 24 hours

In my experiment:

Selected 41 stations



2) Collection

Same timestamp and message

→ **Same comm**

Several station No.

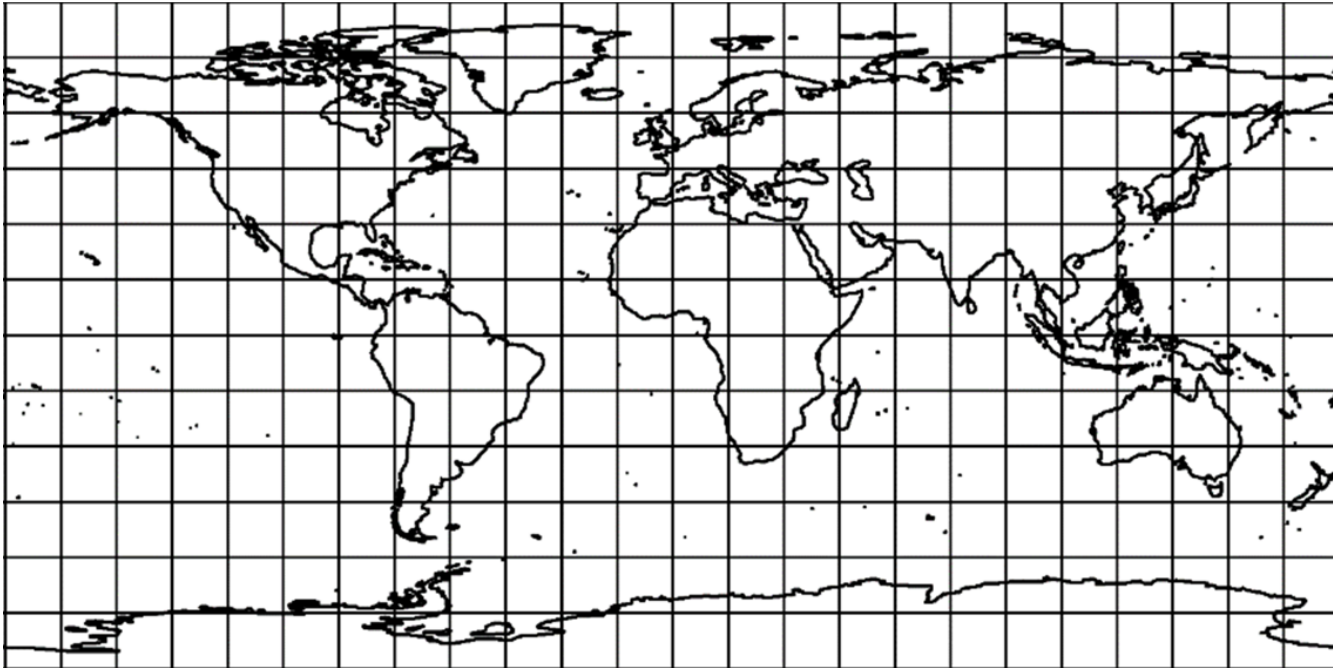
→ **Observed in several locations**

e.g.) Korea → China
4 stations observed

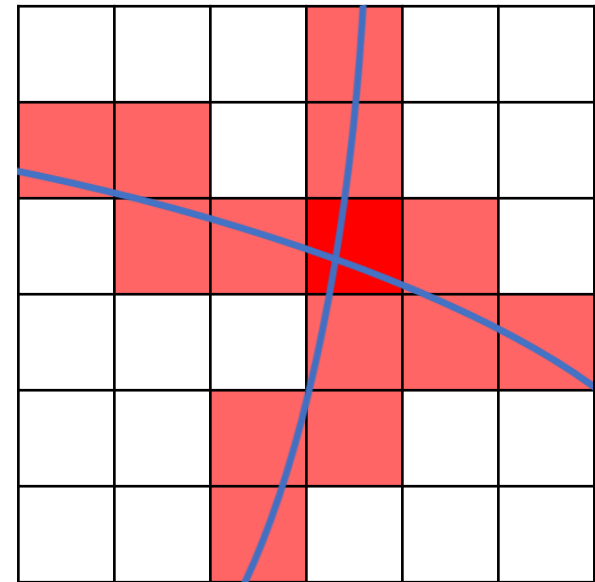
timestamp	station No.	message
2024/6/10 10:10:45	1	<u>BH4HFU</u> <u>HL2IDT</u> PM37
2024/6/10 10:10:45	2	BH4HFU HL2IDT PM37
2024/6/10 10:10:45	19	BH4HFU HL2IDT PM37
2024/6/10 10:10:45	30	BH4HFU HL2IDT PM37
2024/6/10 10:10:45	2	CO6XDX W8NGA EM89
2024/6/10 10:10:45	10	CO6XDX W8NGA EM89
2024/6/10 10:10:45	27	CO6XDX W8NGA EM89
2024/6/10 10:10:45	28	CO6XDX W8NGA EM89
2024/6/10 10:10:45	31	CO6XDX W8NGA EM89
2024/6/10 10:10:45	32	CO6XDX W8NGA EM89
2024/6/10 10:10:45	38	CO6XDX W8NGA EM89

3) Analysis

1. Divide the world map into $5^\circ \times 5^\circ$ blocks
2. Increase the rating value where comms have passed



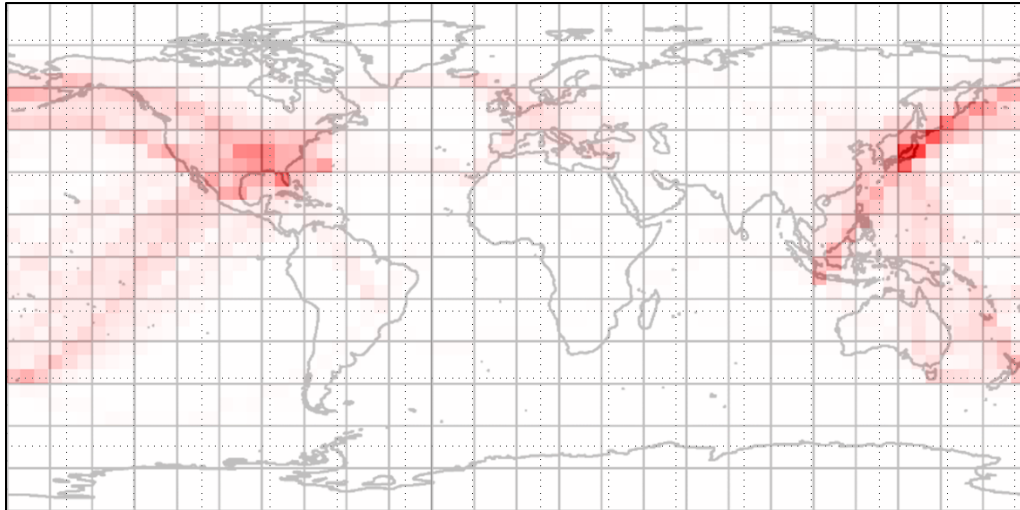
union set approach



3) Analysis

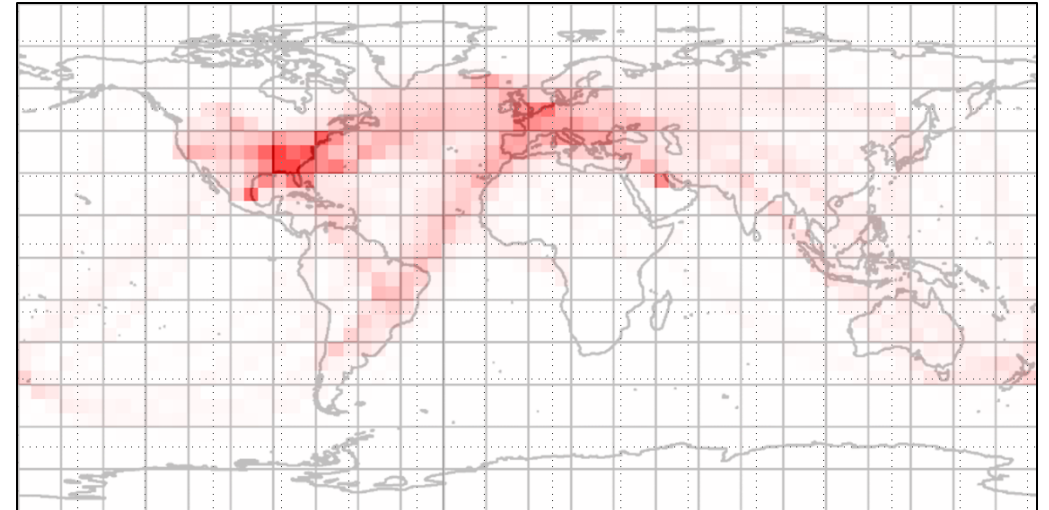
Configured heatmaps from the collected data

10:16 – 10:29 UTC



High evaluation value
near **the Pacific Ocean**

22:16 – 22:29 UTC



High evaluation value
near **the Atlantic Ocean**

3) Analysis

Problem:

The uncolored area:

- Comm did not pass?
- The ionosphere was not suitable for propagation?



Need to estimate **dead zone** (areas with poor signal sensitivity)

3) Analysis

Estimation of dead zone

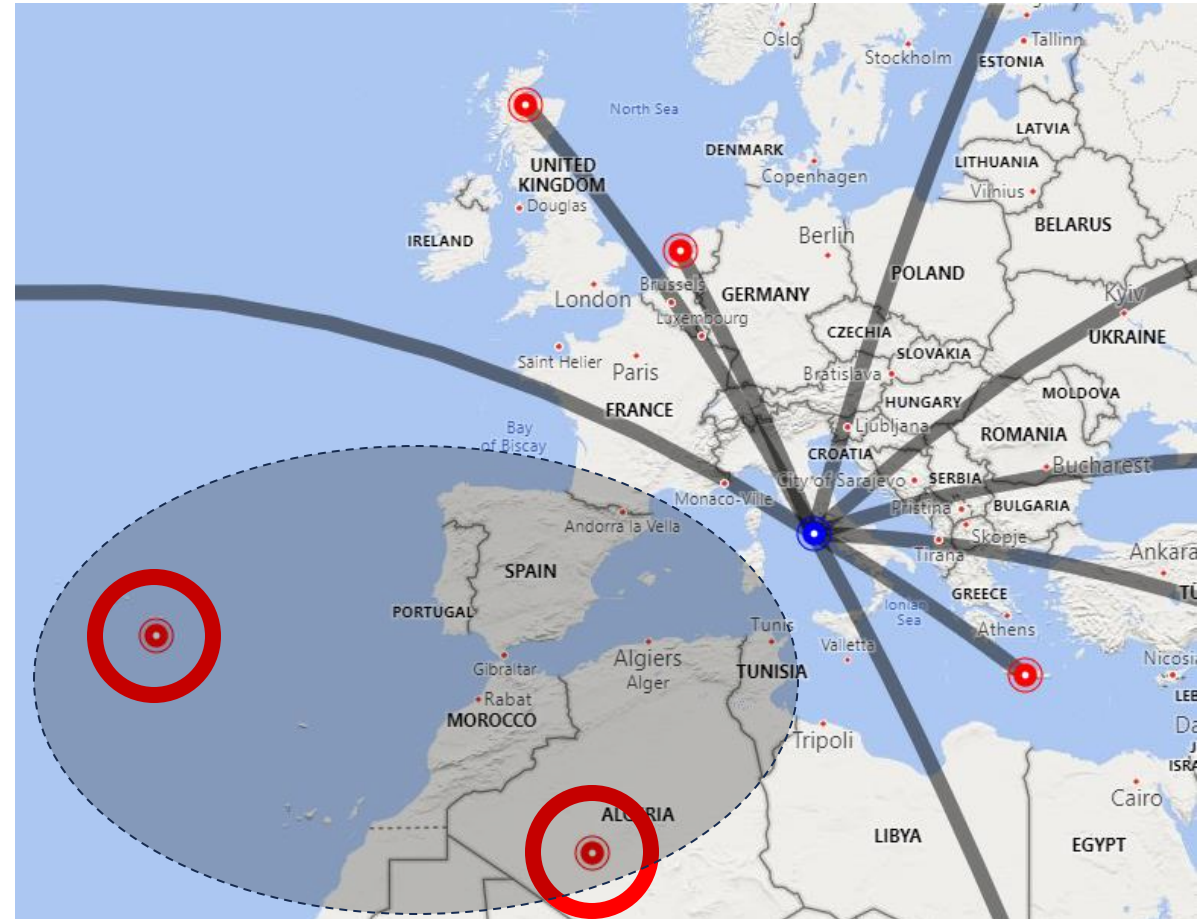
Blue pin: transmission sta.

Red pins: observation sta.

Failed to catch the comm in stations to the **southwest**



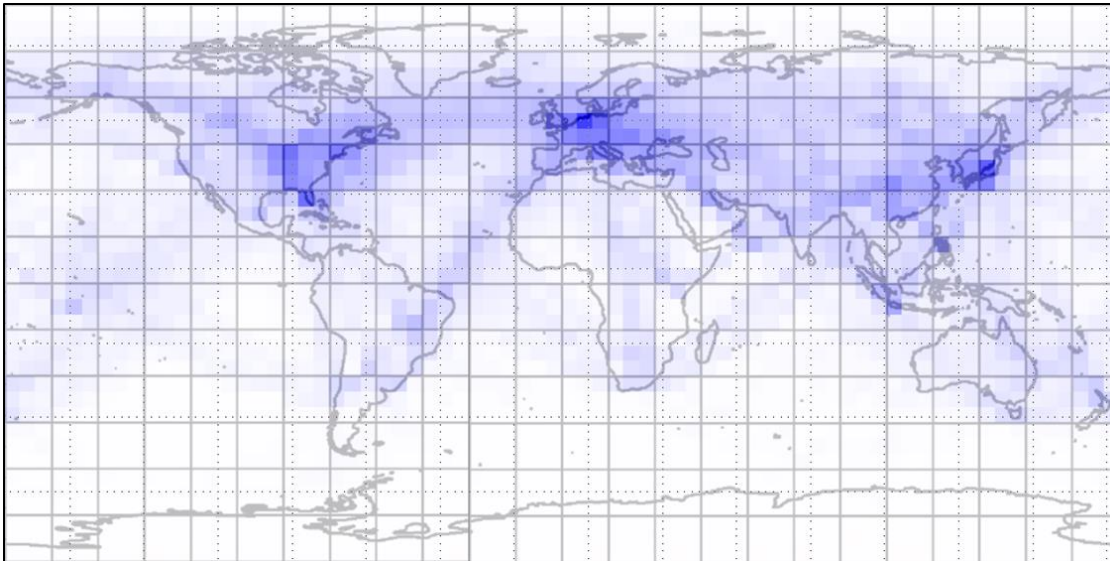
Assume the southwest direction is not suitable for propagation



3) Analysis

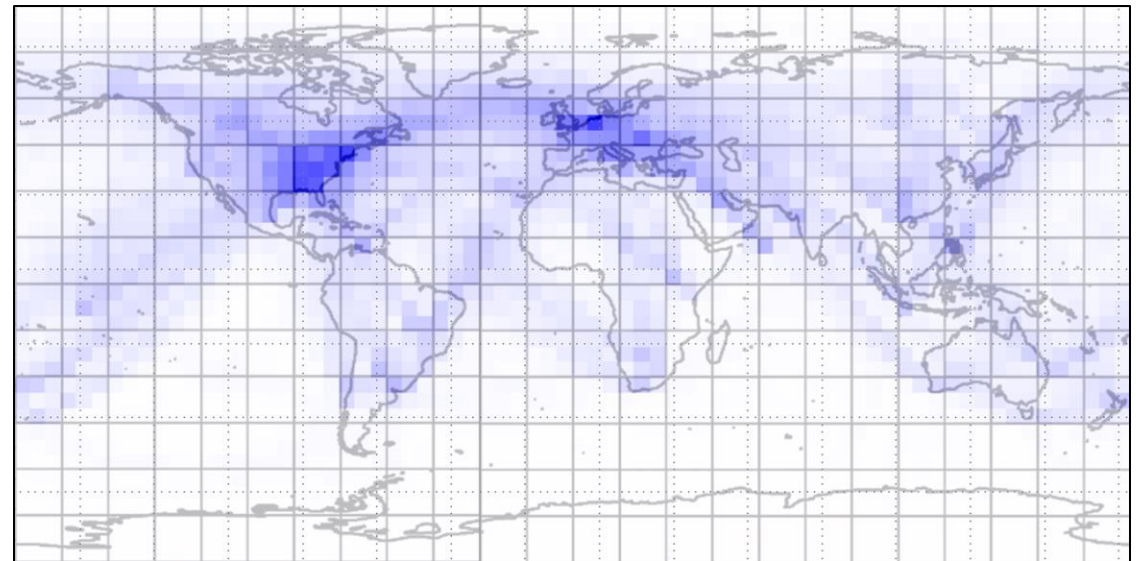
- Estimation of dead zone

10:16 – 10:29 UTC



Inactive around Russia, Japan

22:16 – 22:29 UTC

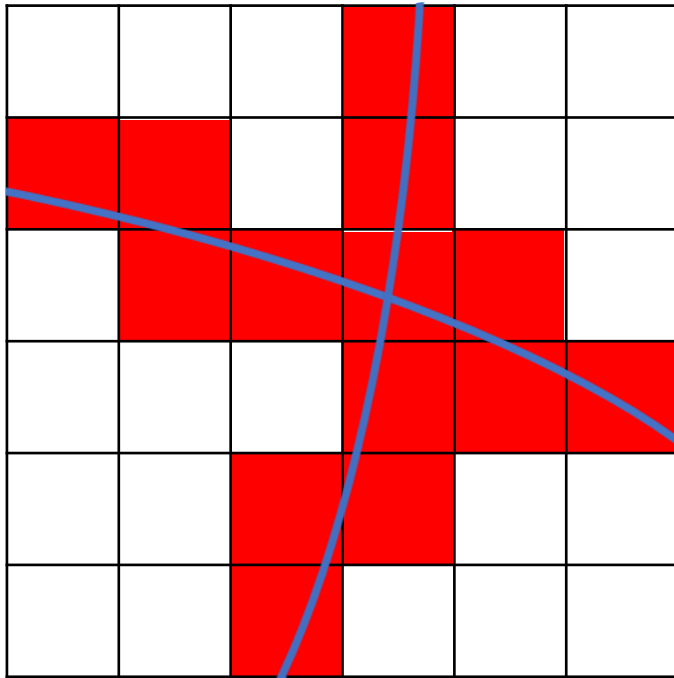


Inactive around U.S.

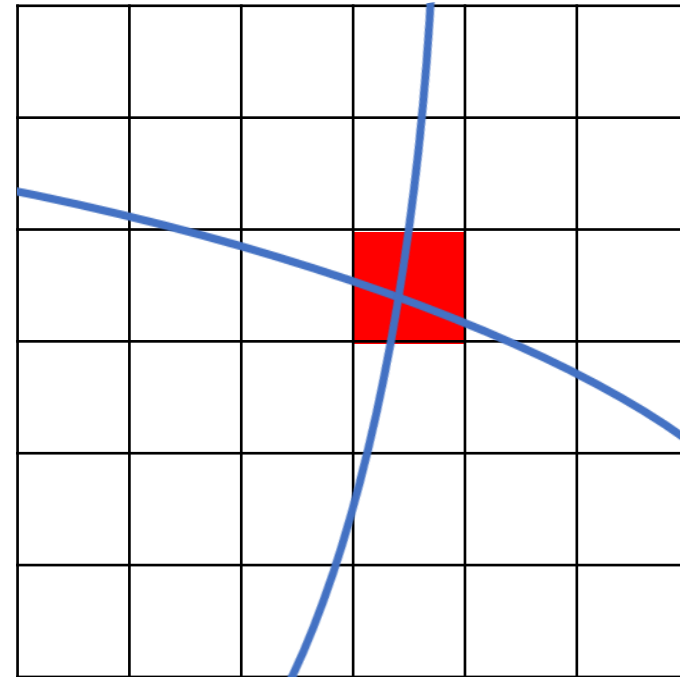
Other approaches

Trying to implement other approaches

1. union set approach



2. intersection set approach



Other approaches

HF are reflected between the ionosphere and the earth's surface



Only the electron densities **at high altitudes** matter



Previous approaches do not take **altitude information** into account

