

SAPT 2024

GNSS反射法を用いた地表面特性推定 と信号処理手法の改善

大阪公立大学 工学研究科
航空宇宙工学海洋系専攻
衛星航法研究室
指導教員：辻井利昭教授
修士1年 北村章人

- 研究背景, 目的
- GNSS反射法による地表面特性推定について
- 実験手法
 - 水面実験
 - コンクリート面実験
 - 土壌面（裸地）実験
- 改善に向けて
- まとめと今後の課題

全地球測位衛星システム(GNSS: Global Navigation Satellite System)技術の発展
→GNSS反射法と呼ばれる技術が注目されている。

GNSS反射法

地表面や海面から反射したGNSS信号電波を受信することによる
リモートセンシング手法。

研究対象：海上風速，海面高度，積雪量，**土壌水分量**など

地表面の特性によって，電力反射率及び比誘電率が変化する性質。



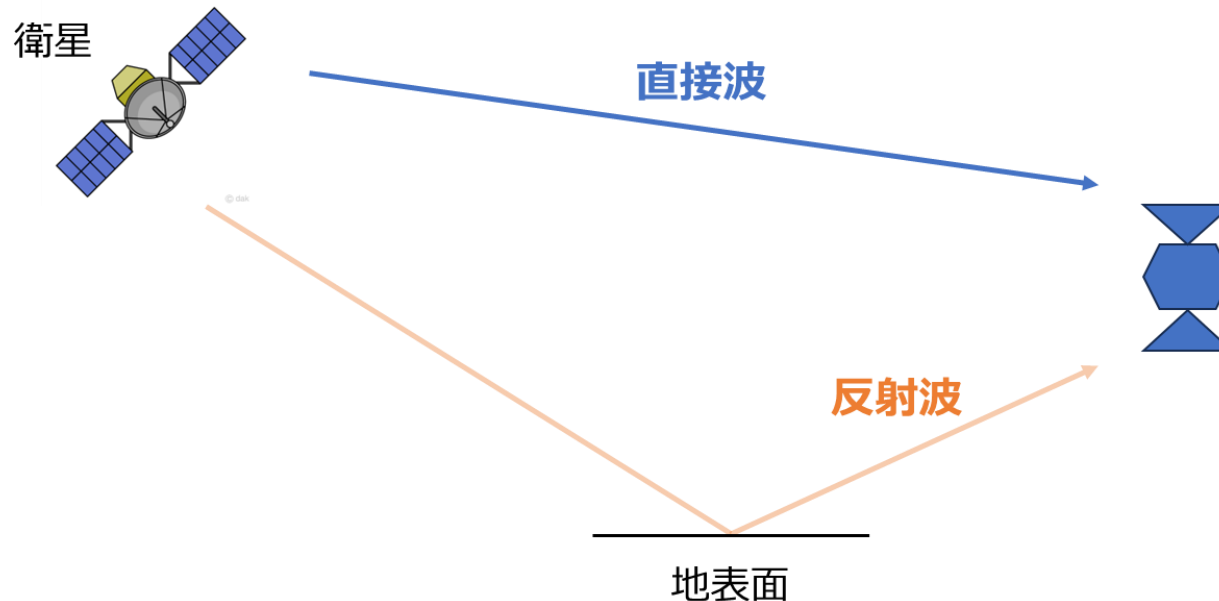
➡ **地表面特性推定**を行う（水文学，気候学，農業などでの応用が期待）。

衛星からの直接波と反射波を受信し、信号処理を行うことで地表面特性を推定する。

問題点

- ・反射波が地表面との反射で減衰され、正確な信号捕捉ができないことがある。
- ・正確な計測を行うためには利得の大きい高価なアンテナを用いる必要がある。

➡ 微弱な信号でも推定を可能にする。



- ▣ 研究背景, 目的
- ▣ GNSS反射法による地表面特性推定について
- ▣ 実験手法
 - 水面実験
 - コンクリート面実験
 - 土壌面（裸地）実験
- ▣ 改善に向けて
- ▣ まとめと今後の課題

<地面特性推定フローチャート>

① 直接信号：RHCPアンテナ
反射信号：LHCPアンテナ
で受信する.



② 信号捕捉を行い,直接信号と
反射信号のSNRをそれぞれ
求める.



③ 電力反射率および比誘電率
を求める.

<地面特性推定フローチャート>

① 直接信号：RHCPアンテナ
反射信号：LHCPアンテナ
で受信する。



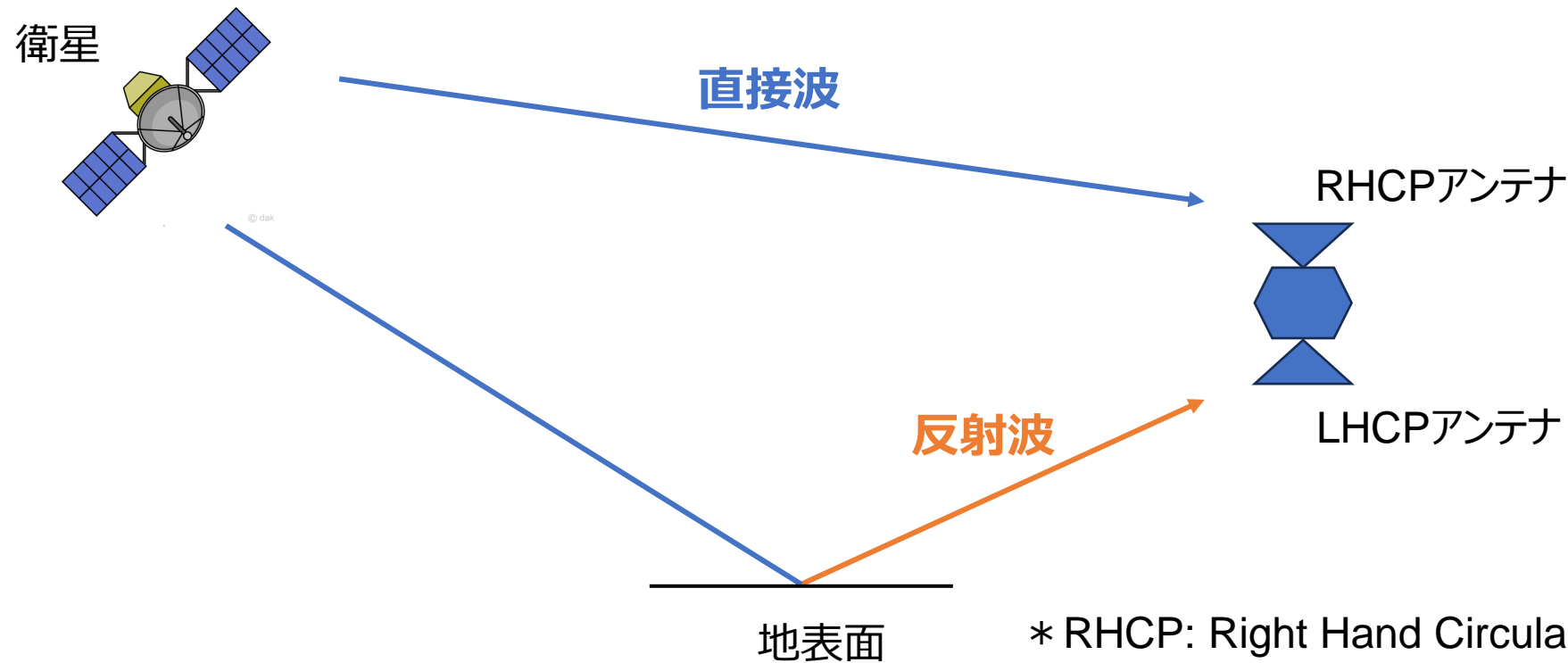
② 信号捕捉を行い、直接信号と
反射信号のSNRをそれぞれ
求める。



③ 電力反射率および比誘電率
を求める。

- ① 直接信号：RHCPアンテナ
反射信号：LHCPアンテナ
で受信する.

GNSS衛星は**右旋円偏波(RHCP)信号**を送信するが、その信号が一度反射すると主に**左旋円偏波(LHCP)信号**へと変化する性質がある。
→両方に感度を持つ**両円偏波アンテナ**を使用。



* RHCP: Right Hand Circular Polarization
* LHCP: Left Hand Circular Polarization

<地面特性推定フローチャート>

① 直接信号：RHCPアンテナ
反射信号：LHCPアンテナ
で受信する。



② 信号捕捉を行い,直接信号と
反射信号のSNRをそれぞれ
求める。

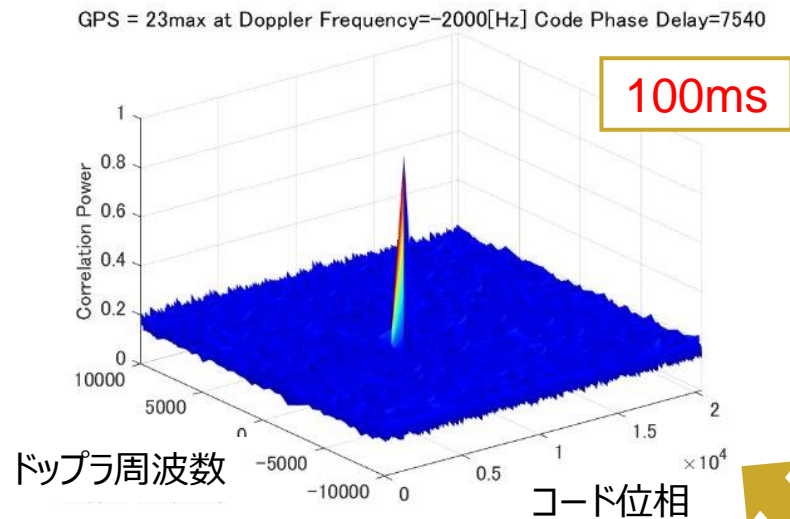
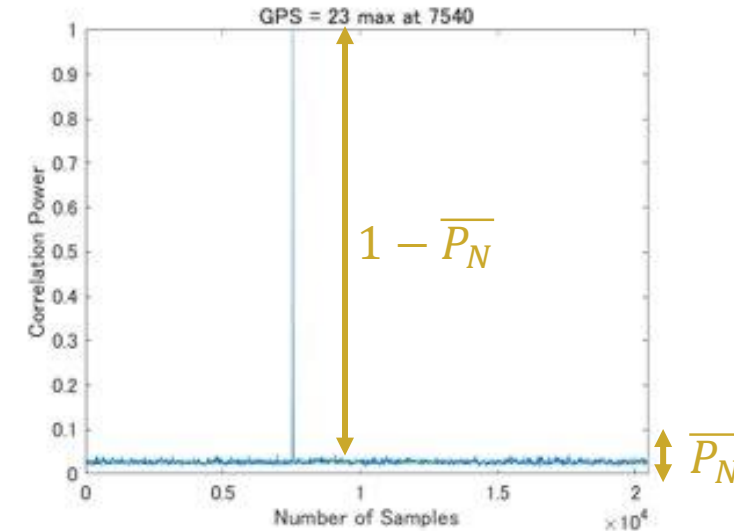


③ 電力反射率および比誘電率
を求める。

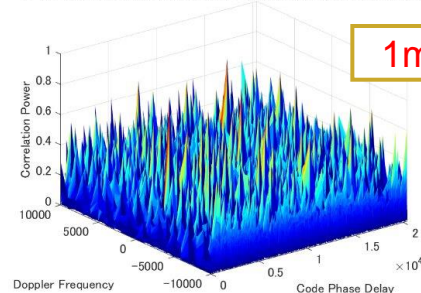
GNSS反射法による地表面特性推定について

- ② 信号捕捉を行い、直接信号と反射信号のSNRをそれぞれ求める。

＜横から見た図＞



GPS = 23max at Doppler Frequency=-3000[Hz] Code Phase Delay=1156



非コヒーレント積算により、
信号捕捉をしやすく

$$SNR = \frac{1 - \overline{P_N}}{\overline{P_N}}$$

* SNR(信号対雑音比): Signal to Noise Ratio

<地面特性推定フローチャート>

① 直接信号：RHCPアンテナ
反射信号：LHCPアンテナ
で受信する。



② 信号捕捉を行い、直接信号と
反射信号のSNRをそれぞれ
求める。



③ 電力反射率および比誘電率
を求める。

③ 電力反射率および比誘電率を求める.

反射信号の SNR (信号対雑音比)は,

$$SNR_{reflect} = \frac{P_t G_t}{4\pi(R_1 + R_2)^2} \frac{G_r \lambda^2 G_D}{4\pi P_N} |R_{lr}|^2$$

直接信号の SNR は,

$$SNR_{direct} = \frac{P_t G_t}{4\pi R_3^2} \frac{G_r \lambda^2 G_D}{4\pi P_N}$$

2式より,

$$\frac{SNR_{reflect}}{SNR_{direct}} = \frac{R_3^2}{(R_1 + R_2)^2} |R_{lr}|^2 \cdot C \approx |R_{lr}|^2$$

R_{lr} : フレネル反射係数

P_t : 送信信号電力

G_t : 送信アンテナゲイン

G_r : 受信アンテナゲイン

G_D : プロセスゲイン

P_N : ノイズ電力

R_1 : 衛星から鏡面点までの距離

R_2 : 受信機から鏡面点までの距離

R_3 : 衛星から受信機までの距離

λ : 波長

C は校正パラメータ(1とする)

電力反射率は,

$$\Gamma_{lr} = |R_{lr}(el)|^2 e^{-h \cos^2(el)} \approx |R_{lr}(el)|^2$$

Γ_{lr} : 反射面の電力反射率

h : 粗さパラメータ (0と仮定)

el : 衛星仰角

ε_r : 比誘電率

フレネル反射係数は,

$$R_{lr} = \frac{1}{2} (R_{vv} - R_{hh})$$

$R_{vv}(el)$, $R_{hh}(el)$ はそれぞれ水平偏光, 垂直偏光のフレネル係数であり,

$$R_{vv}(el) = \frac{\varepsilon_r \sin(el) - \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2(el)}}{\varepsilon_r \sin(el) + \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2(el)}}$$

$$R_{hh}(el) = \frac{\sin(el) - \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2(el)}}{\sin(el) + \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2(el)}}$$

実験データ \rightarrow SNRの比 $\rightarrow R_{lr} \rightarrow$ 電力反射率 Γ_{lr}
比誘電率 ε_r

- ▣ 研究背景, 目的
- ▣ GNSS反射法による地表面特性推定について
- ▣ 実験手法
 - 水面実験
 - コンクリート面実験
 - 土壌面（裸地）実験
- ▣ 改善に向けて
- ▣ まとめと今後の課題

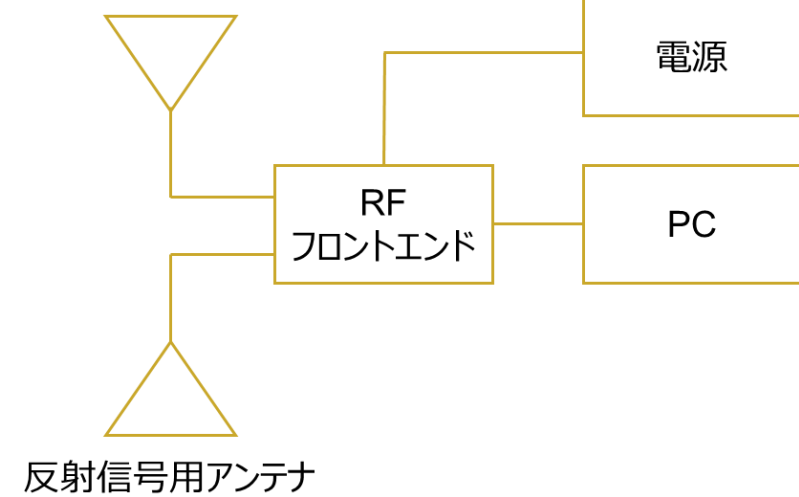


アンテナ配置（コンクリート面）



アンテナ配置（拡大図）

直接信号用アンテナ



反射信号用アンテナ

実験接続図



両円偏波アンテナ



RFフロントエンド



データ記録PC

微弱な反射信号を強める手法

① アンプによる信号増幅

② 非コヒーレント積算時間100ms→200msによる信号増幅



アンプ（12dB増幅）

条件	アンプ	非コヒーレント積算時間
A	なし	100ms
B	あり	100ms
C	あり	200ms

* オープンスカイ環境（障害物なし）

* 計測：180s間のデータを取得し，40~140sの100s間を5sごとに解析

	水面	コンクリート面	土壌面（裸地）
観測点			
観測対象域			

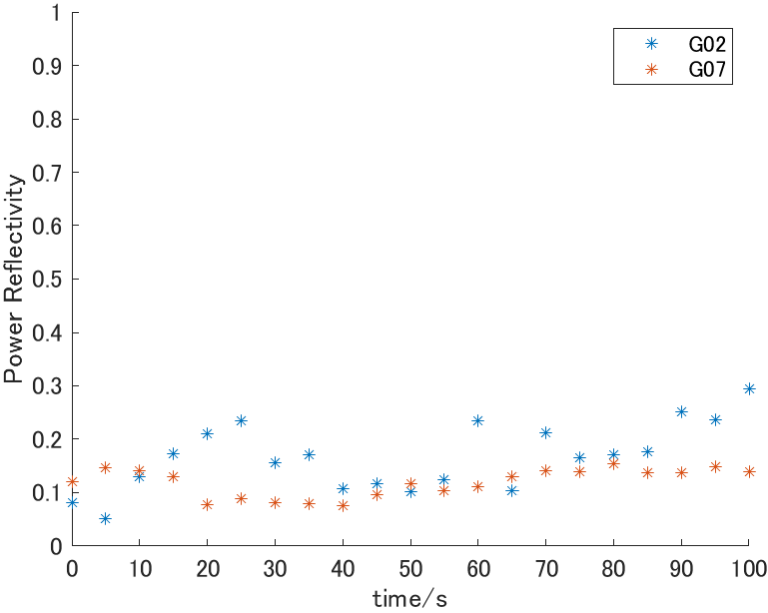


実験セットアップ

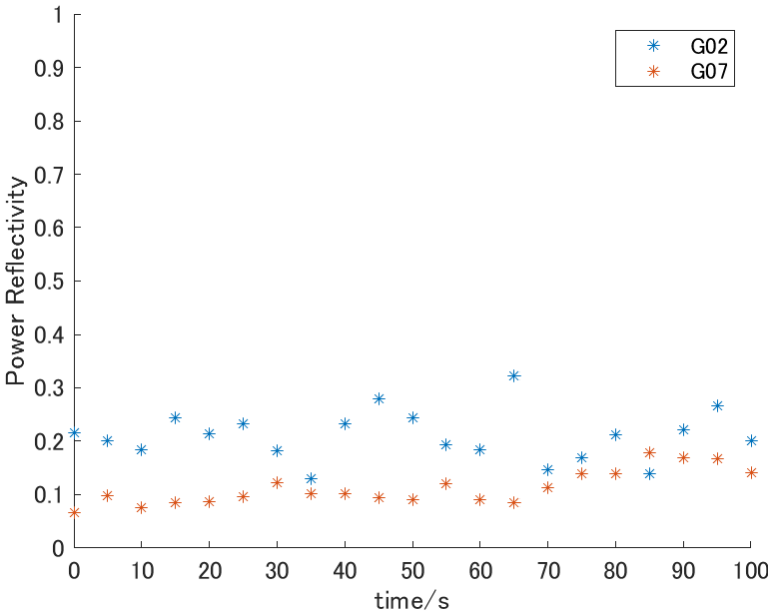


衛星配置

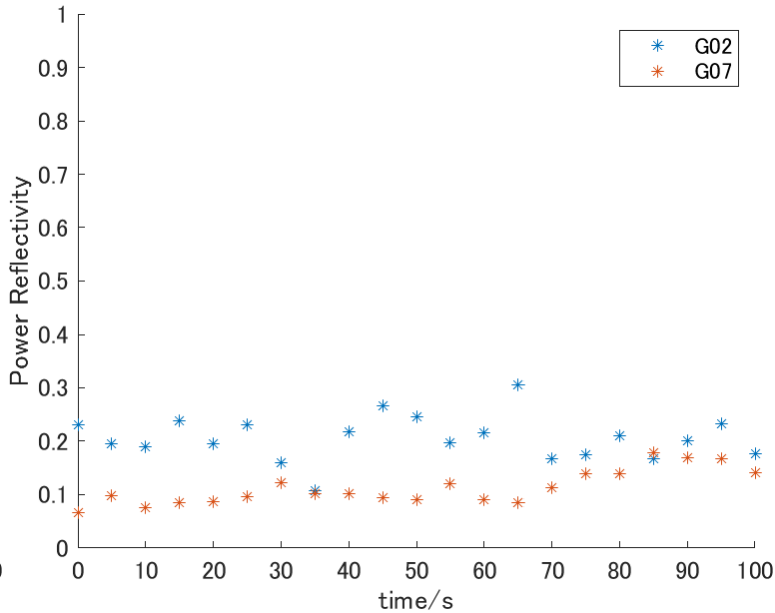
条件	アンプ°	非コヒーレント積算時間
A	なし	100ms
B	あり	100ms
C	あり	200ms



条件A(アンプなし,100ms)



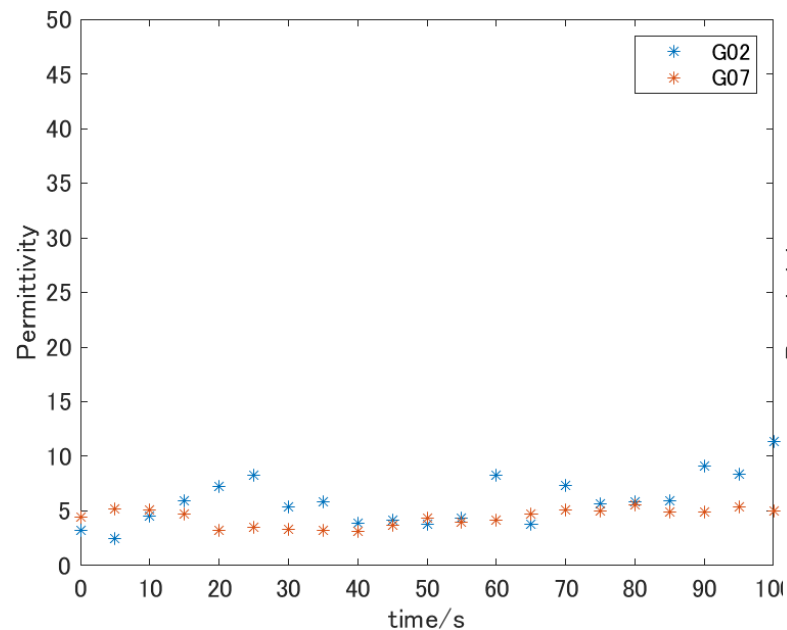
条件B(アンプあり,100ms)



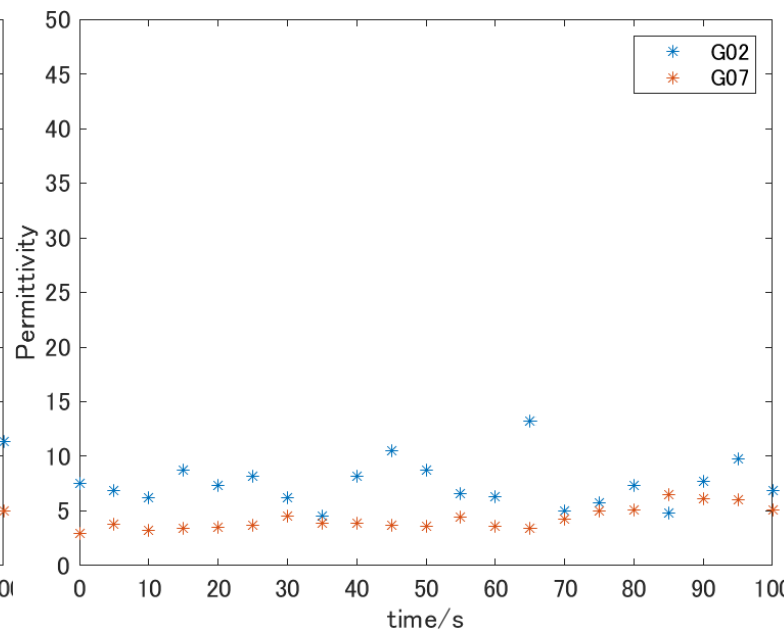
条件C(アンプあり,200ms)

	G02	G07	Average
A	0.17	0.15	0.16
B	0.21	0.11	0.16
C	0.21	0.11	0.16

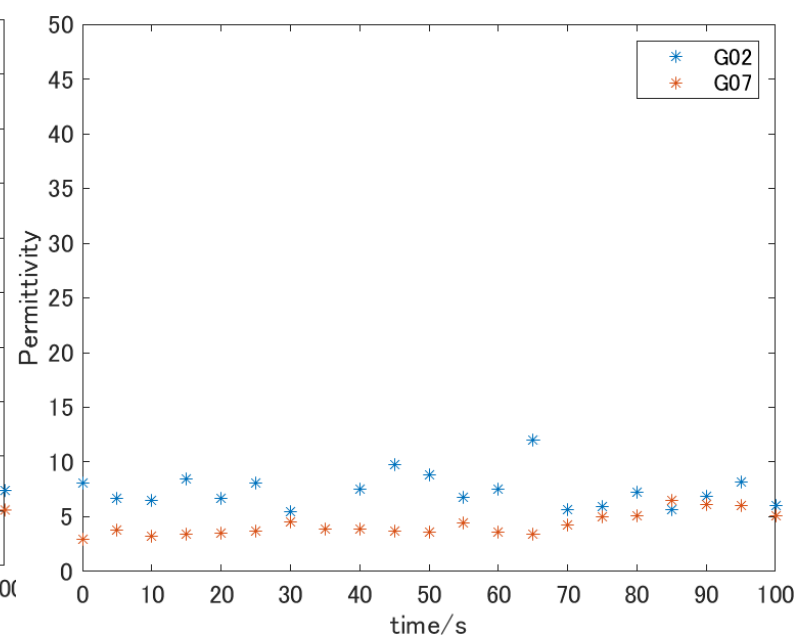
水面実験結果 比誘電率



条件A (アンプなし,100ms)



条件B (アンプあり,100ms)



条件C (アンプあり,200ms)

	G02	G07	Average
A	5.94	5.57	5.76
B	7.43	4.27	5.86
C	7.24	4.27	5.76

		水面	コンクリート面	裸地
電力 反射率	A	0.16	0.18	0.23
	B	0.16	0.18	0.32
	C	0.16	0.19	0.27
比誘 電率	A	5.76(80)	6.96(5.24)	9.28(15)
	B	5.86(80)	7.03(5.24)	17.6(15)
	C	5.76(80)	6.95(5.24)	12.8(15)

()内は文献値^[1]

- ・コンクリート面，裸地では条件C(アンプあり,200ms)のとき最も文献値に近い値が得られた（赤字）。
→今回の提案手法の成果を確認.

- ・水面の値が文献値から大きくずれてしまった。
→実験器具，実験環境（電波環境）の見直し，調査。
→信号処理方法の改善.

- ▣ 研究背景, 目的
- ▣ GNSS反射法による地表面特性推定について
- ▣ 実験手法
 - 水面実験
 - コンクリート面実験
 - 土壌面（裸地）実験
- ▣ 改善に向けて
- ▣ まとめと今後の課題

安定性向上を目指して

- ①水面，草地実験が上手くいかなかった原因の究明．→実験機器，環境の見直し．
- ②RFフロントエンドが発するノイズを抑制する．→シールドケースの製作．

精度向上を目指して

- ③取得データ数の増加．→GPS以外の衛星も利用し，3衛星以上のデータを平均する．
- ④信号処理方法の改善．→2bitIQから4bitIQへ

④ 信号処理を2bitIQ→4bitIQに変更

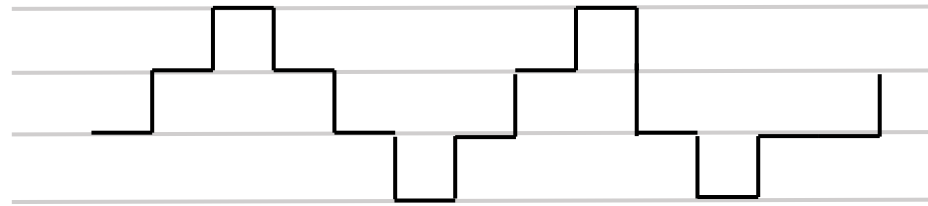
4bitIQで取得，処理することでアナログ信号→デジタル信号を正確に行える。
2bitIQ = 4段階，4bitIQ = 16段階



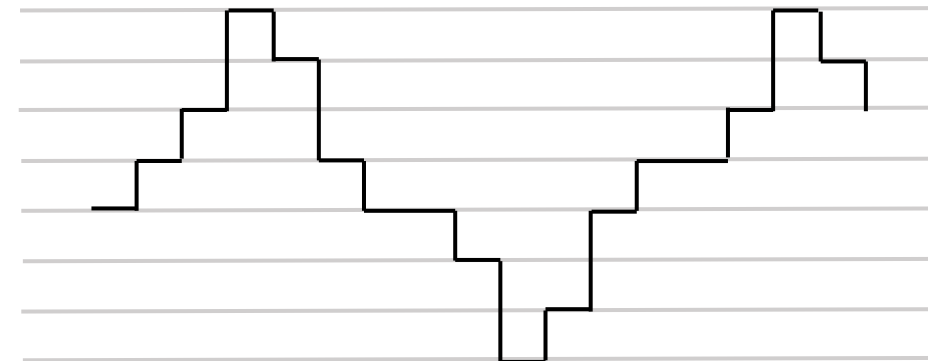
アナログ信号



2bitIQ



3bitIQ



↓
量子化誤差減

④ 信号処理を2bitIQ→4bitIQに変更

LUT(Look Up Table)：前もって計算された値のセットを格納したテーブルまたは配列のこと。GNSS信号処理では、主に以下の目的で使用する。

1. 量子化された値の変換

デジタル信号処理では、アナログ信号がデジタル値に量子化される。LUTは、これらの量子化された値を実際の信号レベルに対応する値に変換するために使用される。

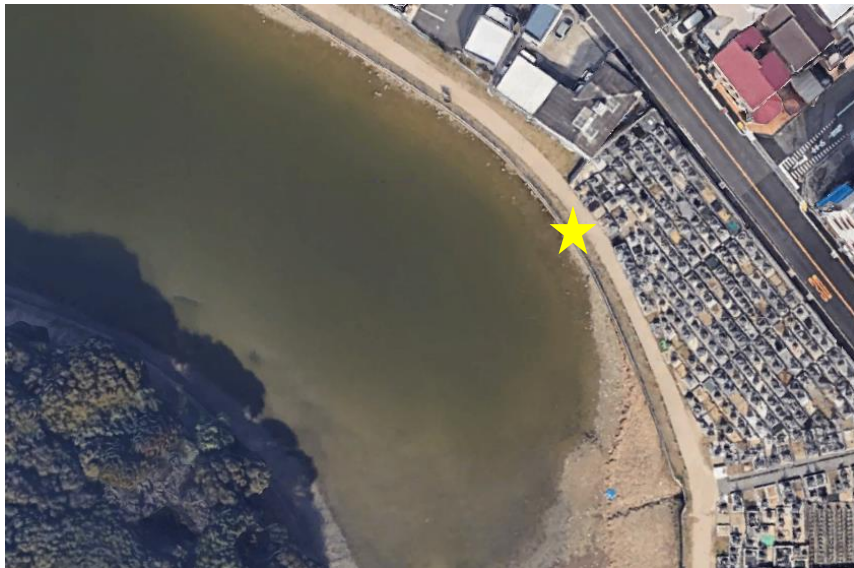
2. 計算の効率化

複雑な計算や関数を、事前に計算された値のテーブルに置き換えることで実行時の計算量を減らし、処理速度を向上させることができる。

2bitIQ・・・ [1 3 -3 -1]

4bitIQ・・・ [1 3 5 7 9 11 13 15 -15 -13 -11 -9 -7 -5 -3 -1]

実験@ニサンザイ古墳



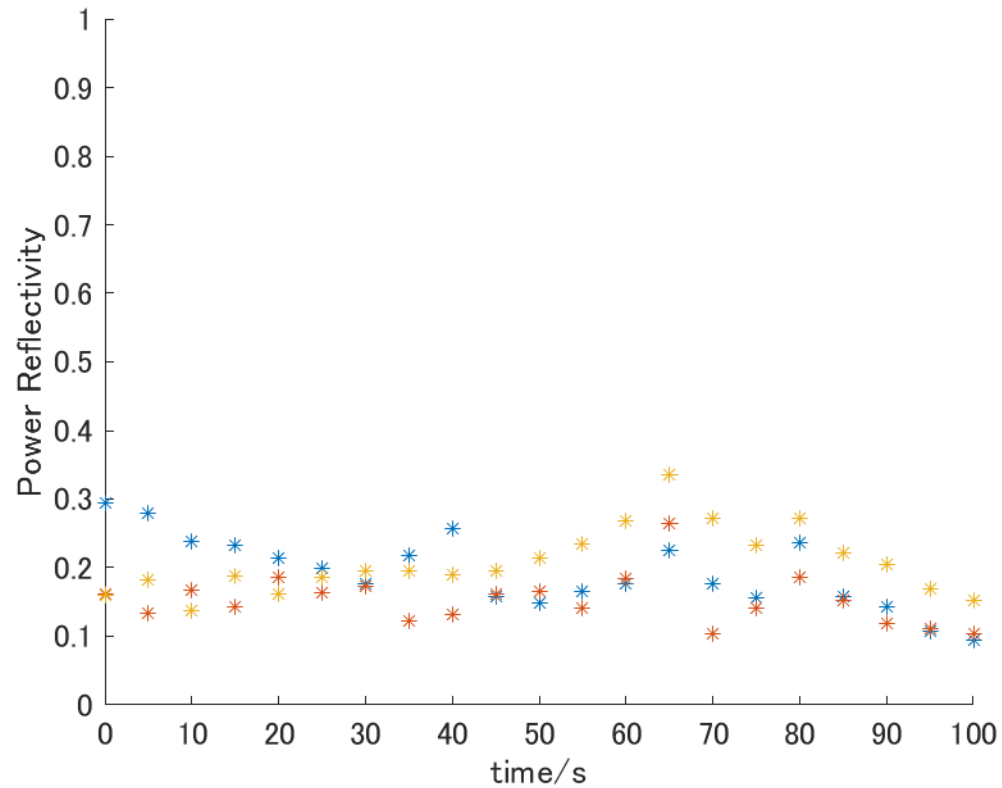
実験環境



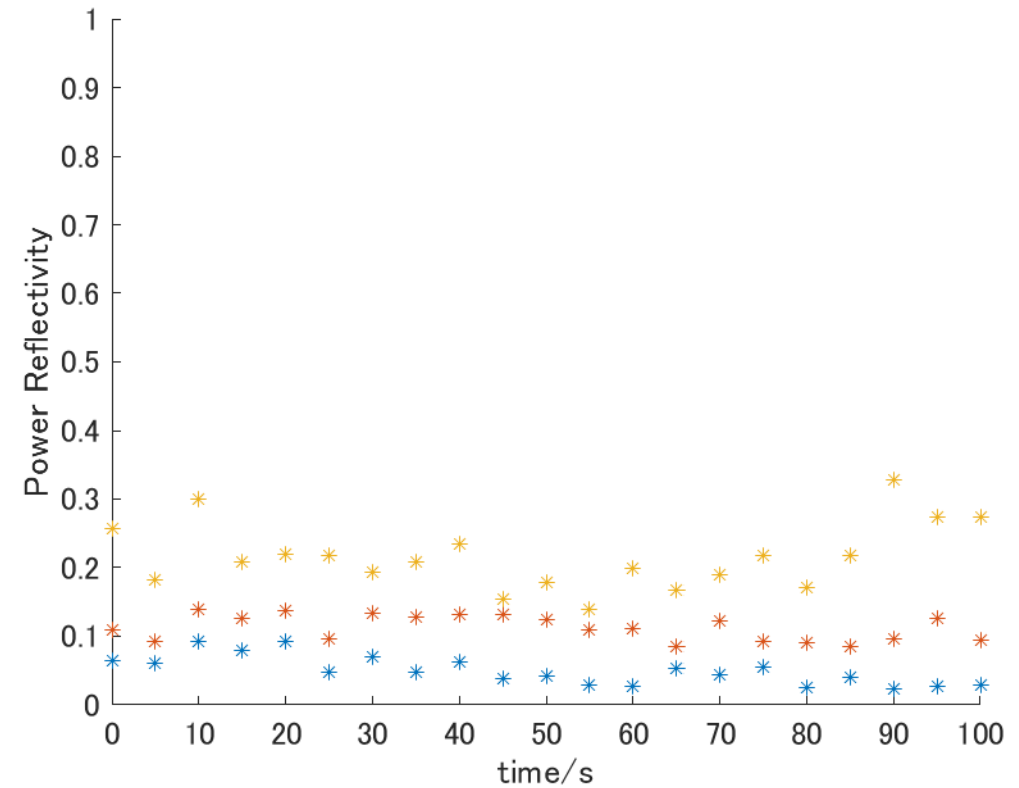
衛星配置

<電力反射率>

2bitIQ

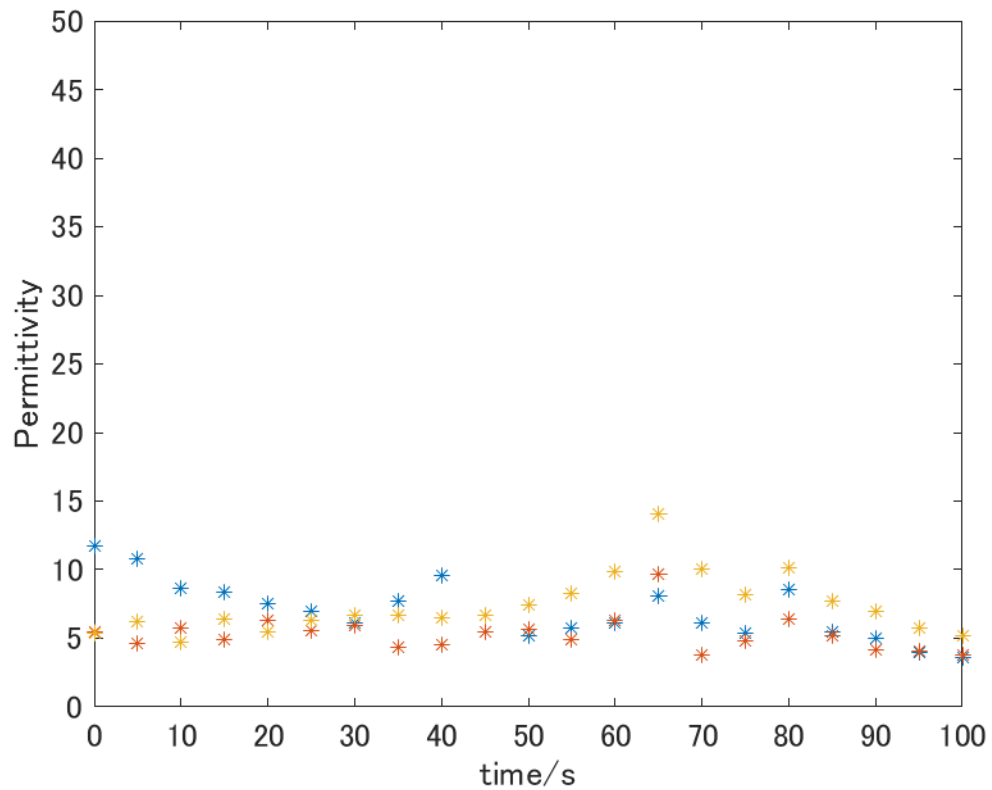


4bitIQ

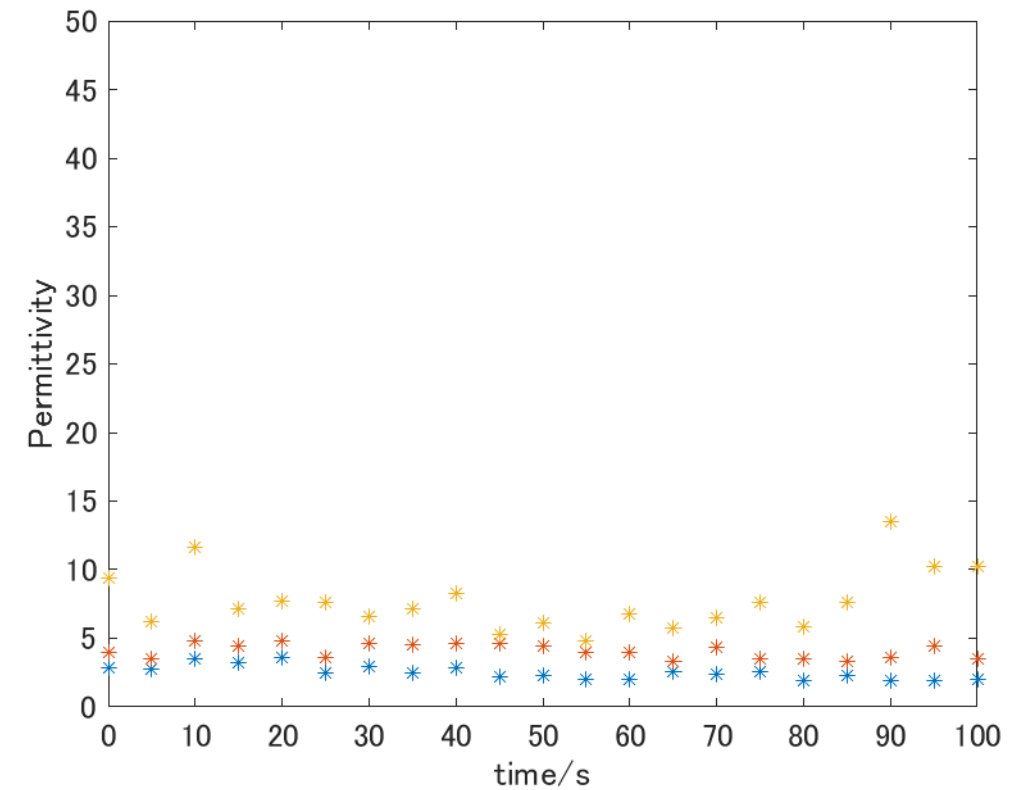


<比誘電率>

2bitIQ



4bitIQ



電力反射率	2bitIQ	4bitIQ	文献値
G10	0.19	0.050	0.63
G23	0.15	0.11	0.63
J196	0.21	0.22	0.63
Average	0.18	0.13	0.63

比誘電率	2bitIQ	4bitIQ	文献値
G10	6.96	2.51	80
G23	5.32	4.07	80
J196	7.37	7.71	80
Average	6.55	4.76	80



2bitIQ→4bitIQとして処理を行ったが、精度の改善は見られなかった。

原因

- ・実験環境の問題（正確な信号捕捉が行えていない）
- ・LUTなど、4bitへの変換過程に問題



新たな実験場所の模索やLUTの再設定に取り組んでいる。

- ▣ 研究背景, 目的
- ▣ GNSS反射法による地表面特性推定について
- ▣ 実験手法
 - 水面実験
 - コンクリート面実験
 - 土壌面（裸地）実験
- ▣ 改善に向けて
- ▣ まとめと今後の課題

- ・両円偏波アンテナを用いたGNSS反射法による地表面特性推定実験を行った。
- ・アンプの有無や非コヒーレント積算時間の変更によって微弱な信号の増幅を図った。
- ・水面，コンクリート面，裸地の3地点について地表面特性推定を行った。
- ・コンクリート面，裸地では文献値に近い値が得られ，提案手法の成果を確認できた。
- ・水面では文献値から値が大きすぎてしまった。
- ・精度と安定性の向上に向けて取り組んでいる。

