

The College of Judea and Samaria



מכללת יהודה ושומרון

Dept. of Electrical and Electronic Engineering

המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה

INDOOR MULTI-PATH PROPAGATION OF UWB AND OFDM SIGNALS

Prof. Yosef Pinhasi

Prof. Asher Yahalom

Dr. Yehoshua Socol

Sergey Petnev

Nir Harpaz

Short Range Consortium

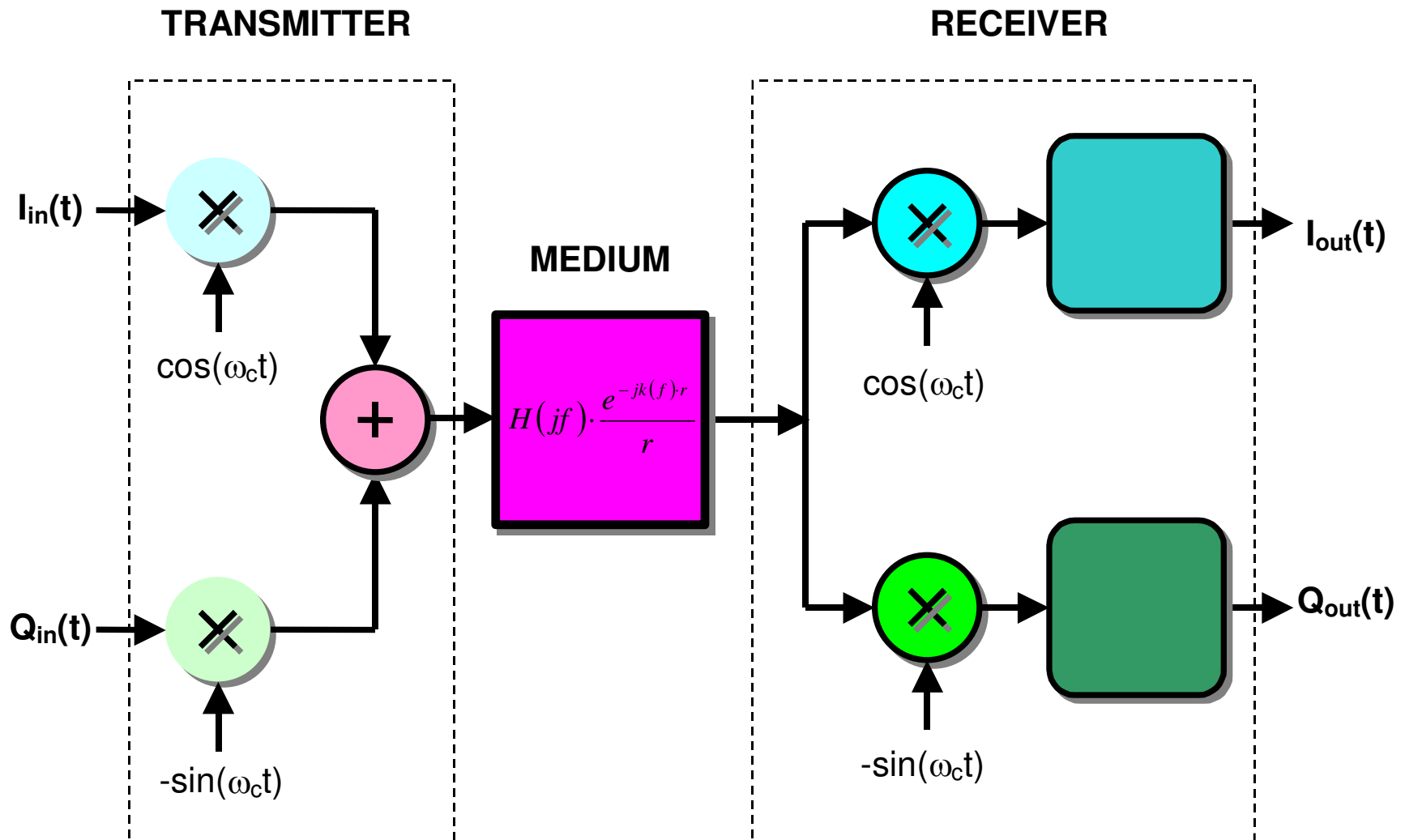


מאגד הישראלי לטווחים קצרים

Propagation model

- Space-frequency multi-reflection propagation model
- Transmission and reflection of polarized signals through many walls
- Indoor multi-path of UWB signals
- Propagation of OFDM signals through a single wall (802.11a)

Communication channel



Modulated signal

$$A_{in}(t) = I_{in}(t) - jQ_{in}(t)$$

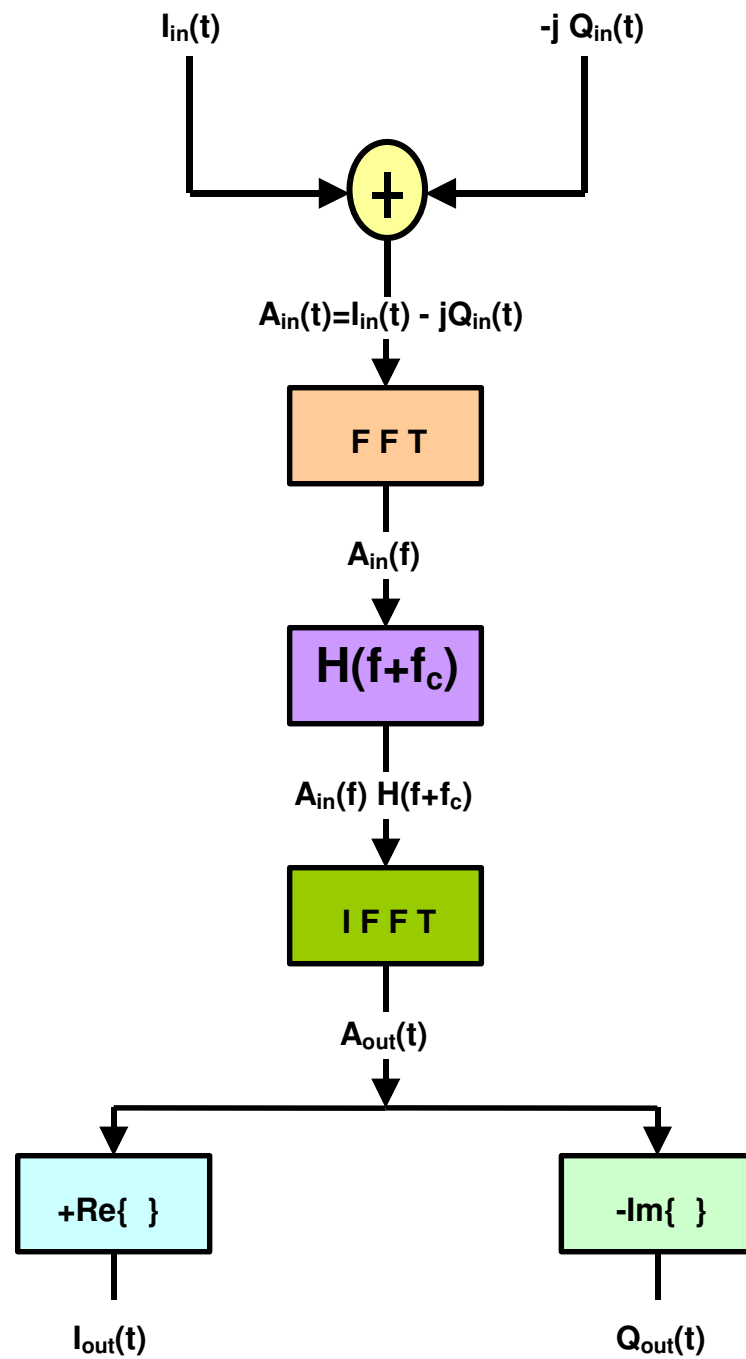
$$E_{in}(t) = \text{Re}\{A_{in}(t) \cdot e^{j2\pi f_c t}\}$$

$$E_{out}(t) = \text{Re}\{A_{out}(t) \cdot e^{j2\pi f_c t}\}$$

$$\begin{aligned} A_{out}(t) &= I_{out}(t) - jQ_{out}(t) = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{A}_{in}(f) \cdot H(f + f_c) \cdot e^{+j2\pi f t} df \end{aligned}$$

Space-frequency approach

- Propagating fields in the frequency domain
- Frequency dependent effects
(absorption, dispersion, multi-path, multi-echos)
- Ultra wide band phenomena
- Polarization
- Consideration of statistical features



Electromagnetic fields in the frequency domain

$$\tilde{\mathbf{E}}(r, f) = H(jf) \cdot \underbrace{\left[\hat{\theta} \cdot F_{\theta}(\theta, \phi) + \hat{\phi} \cdot F_{\phi}(\theta, \phi) \right]}_{\mathbf{F}(\theta, \phi)} \cdot \frac{e^{-jk(f) \cdot r}}{r}$$

$$\tilde{\mathbf{H}}(r, f) = \frac{1}{\eta_0} H(jf) \cdot \left[-\hat{\theta} \cdot F_{\phi}(\theta, \phi) + \hat{\phi} \cdot F_{\theta}(\theta, \phi) \right] \cdot \frac{e^{-jk(f) \cdot r}}{r}$$

Poynting vector:

$$\mathbf{S}(r, f) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ \tilde{\mathbf{E}}(r, f) \times \tilde{\mathbf{H}}^*(r, f) \right\} = \hat{\mathbf{r}} \cdot |H(f)|^2 \frac{1}{2\eta_0} |\mathbf{F}(\theta, \phi)|^2 \cdot \frac{1}{r^2}$$

Propagation factor

$$k(f) = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\varepsilon_r(f)} = -j\alpha(f) + \beta(f)$$

Attenuation factor:

$$\alpha(f) = -\text{Im}\{k(f)\} = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon'(f)}{2} \left\{ \sqrt{1 + \tan^2[\delta(f)]} - 1 \right\}}$$

Wavenumber:

$$\beta(f) = \text{Re}\{k(f)\} = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon'(f)}{2} \left\{ \sqrt{1 + \tan^2[\delta(f)]} + 1 \right\}}$$

Complex dielectric constant

Permittivity:

$$\varepsilon(f) = \varepsilon_r(f) \cdot \varepsilon_0 = \underbrace{[1 + \chi_e(f)]}_{\varepsilon_r(f)} \cdot \varepsilon_0 = \underbrace{\left\{ \underbrace{[1 + \chi_e'(f)]}_{\varepsilon'(f)} - j \underbrace{\chi_e''(f)}_{\varepsilon''(f)} \right\}}_{\varepsilon_r(f)} \cdot \varepsilon_0$$

$$\varepsilon''(f) = \frac{\sigma}{2\pi f \cdot \varepsilon_0}$$

Loss tangent:

$$tg[\delta(f)] = \frac{\varepsilon''(f)}{\varepsilon'(f)} = \frac{\chi_e''(f)}{1 + \chi_e'(f)} = \frac{\sigma}{2\pi f \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'(f)}$$

Medium	Dielectric constant ε'	Conductivity σ [S/m]	Frequency
Brick	4.26	0.0197	2.45GHz
Brick	4.44	0.001	4GHz
Brick (made of chalk, with holes)	4.12	0.045	5GHz
Brick (without holes)	3.3	0.00278	5GHz
Brick wall	3.56	0.0946	5GHz
Limestone	7.06	0.0179	2.45GHz
Limestone	7.51	0.028	4GHz
Glass	4	$1.8 \cdot 10^{-7}$	1MHz
Glass	4	$2.7 \cdot 10^{-5}$	100MHz
Glass	7	0.00526	1GHz
Glass	5.98	0.299	5GHz
Glass	4	0.005	10GHz
Concrete	7	0.0451	1GHz
Concrete	4.5	0.00675	2.45GHz
Concrete	5.1	0.146	2.45GHz
Lightweight concrete	2	0.0268	1GHz
Concrete (one year)	5.5	0.0501	5GHz
Concrete (40 years)	4.6	0.0668	5GHz
Fiberglass	1.2	0.00535	1GHz
Sandy soil	2.55	0.00215	2.45GHz
Teflon	2.1	$8.59 \cdot 10^{-5}$	2.45GHz
Wood	1.2	$6.54 \cdot 10^{-4}$	2.45GHz
Wood	5	0.286	2.45GHz
Wood	2.05	0.0823	5GHz
Wood	1.65	0.0654	5GHz

Material characteristics

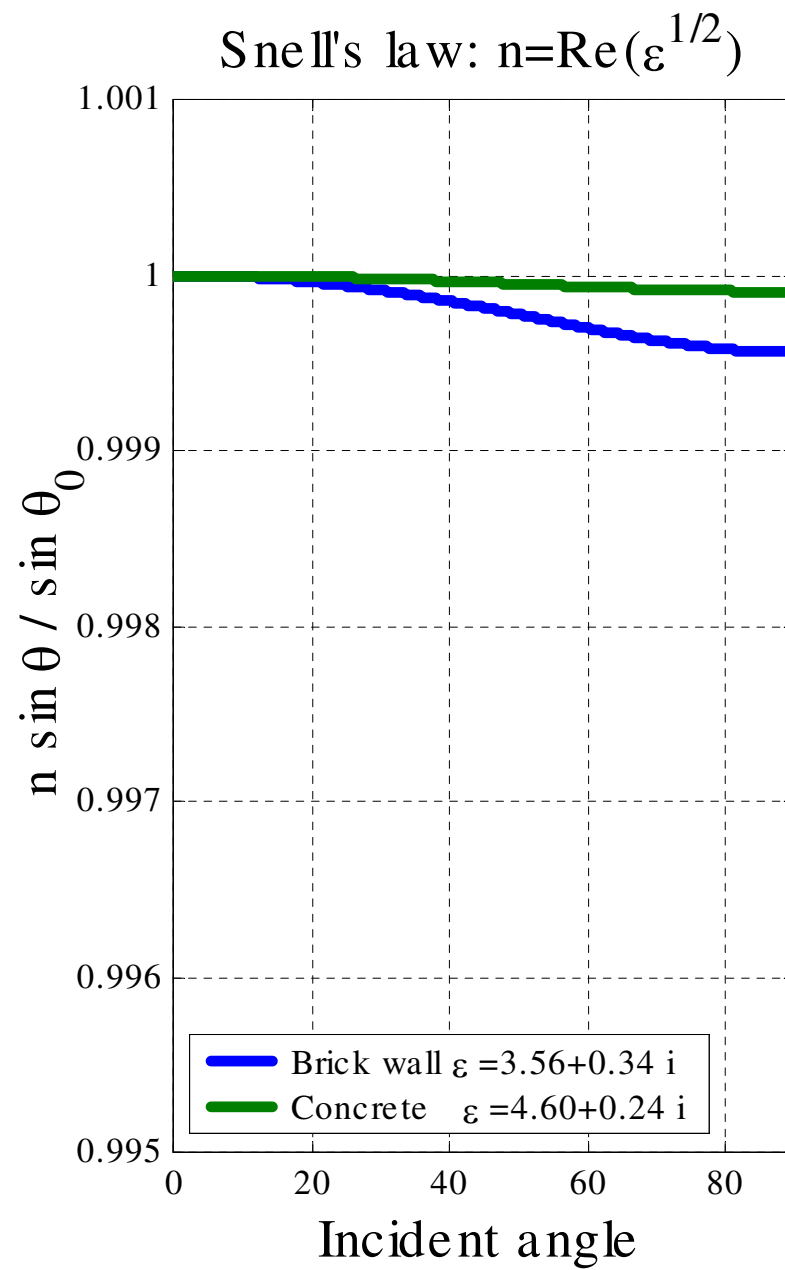
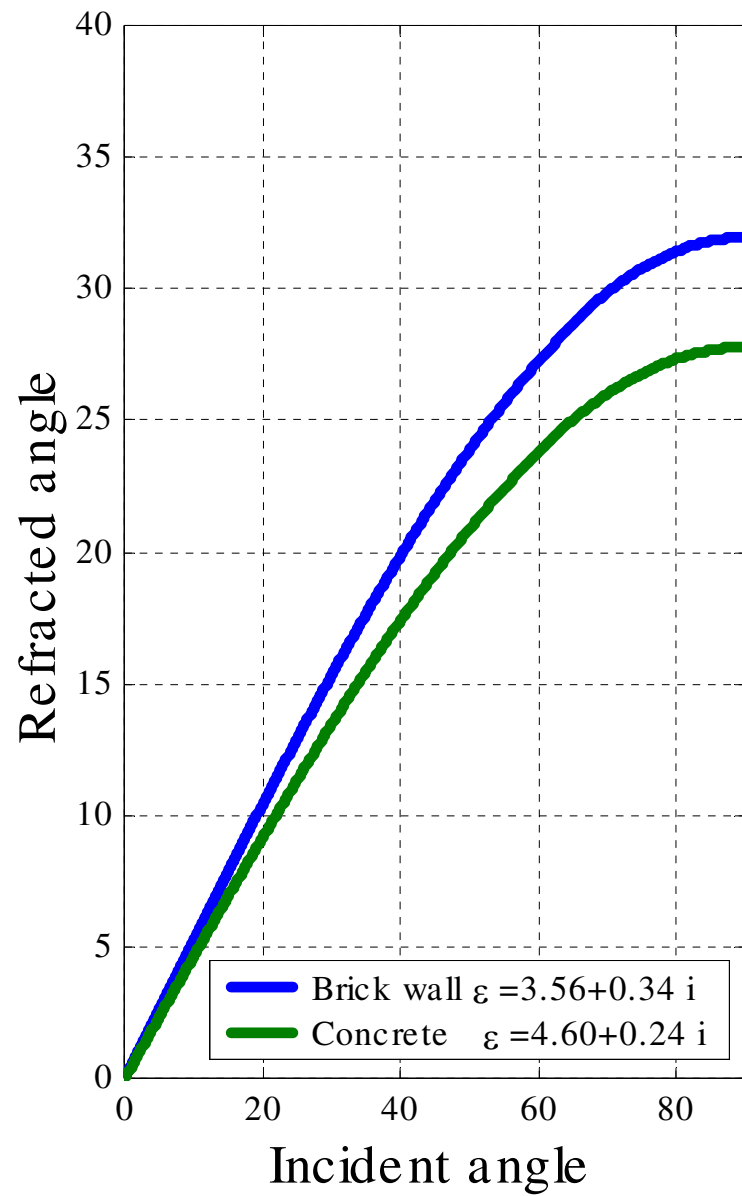
Medium	Dielectric constant ε'	Conductivity σ [S/m]	$\varepsilon'' = \frac{\sigma}{2\pi f \cdot \varepsilon_0}$ f=5GHz	$tg[\delta(f)] = \frac{\varepsilon''(f)}{\varepsilon'(f)}$	Attenuation [dB/cm]
Brick wall	3.56	0.0946	0.3401	0.09553	0.8188
Concrete (1 year)	5.5	0.0501	0.1801	0.03275	0.3492
Concrete (40 years)	4.6	0.0668	0.2402	0.05221	0.5091

Generalized Snell's law

$$\operatorname{tg}(\theta) = \frac{\sin(\theta_0)}{\operatorname{Re} \left\{ \sqrt{\underbrace{(\varepsilon' - j\varepsilon'')}_{\varepsilon_r} - \sin^2(\theta_0)} \right\}}$$

$$\sin(\theta_0) \cong \sqrt{\varepsilon'} \cdot \sin(\theta)$$

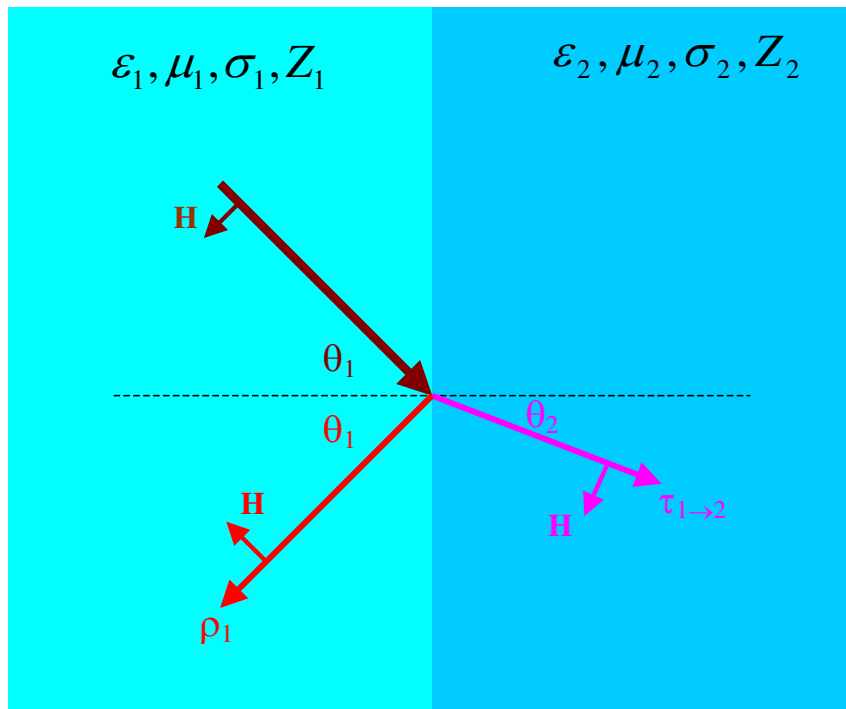
Willebrord van Roijen Snell (1580-1626) - Dutch astronomer and mathematician.



Waves across interfaces

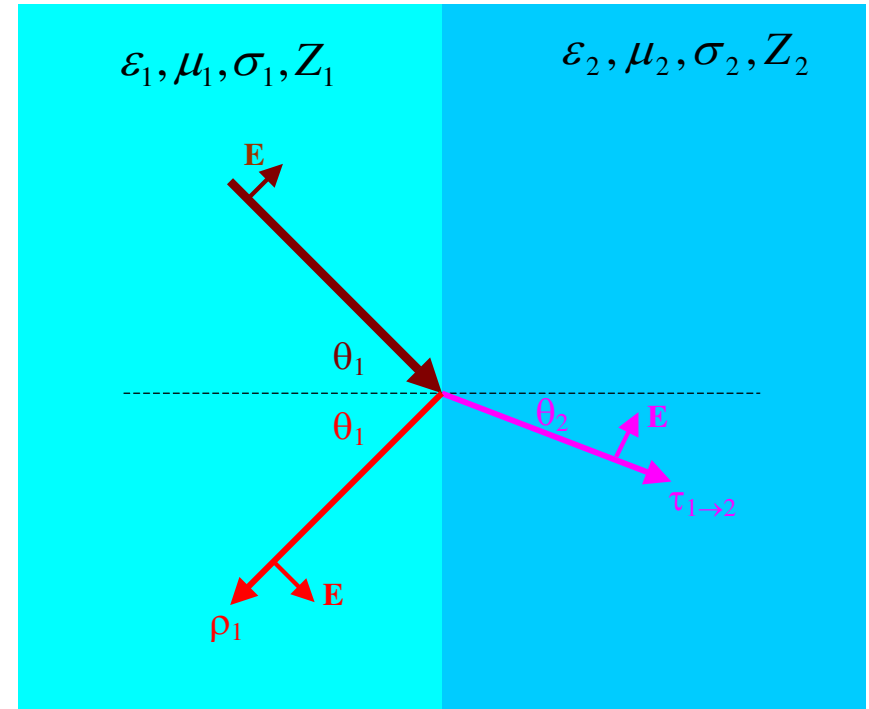
$$\eta = \sqrt{\frac{\mu_r \cdot \mu_0}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0}} = \underbrace{\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}}_{\eta_0} \cdot \sqrt{\frac{\mu_r / \epsilon'}{1 - j \cdot \tan(\delta)}} = \sqrt{\frac{j2\pi f \cdot \mu_r \cdot \mu_0}{\sigma + j2\pi f \cdot \epsilon' \cdot \epsilon_0}}$$

TE Wave



$$Z_{TE} = \eta / \cos(\theta)$$

TM Wave



$$Z_{TM} = \eta \cdot \cos(\theta)$$

Fresnel's formulas

$$\tau_{1 \rightarrow 2} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

$$\tau_{2 \rightarrow 1} = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

$$\rho_1 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = -\rho_2$$

$$\rho^2 + \tau_{1 \rightarrow 2} \cdot \tau_{2 \rightarrow 1} = 1$$

Augustin-Jean Fresnel (1788–1827) - French physicist.

Complex reflection coefficient

$$\rho_{0-TE} = \frac{\frac{\eta}{\cos(\theta)} - \frac{\eta_0}{\cos(\theta_0)}}{\frac{\eta}{\cos(\theta)} + \frac{\eta_0}{\cos(\theta_0)}} = \frac{\eta \cos(\theta_0) - \eta_0 \cos(\theta)}{\eta \cos(\theta_0) + \eta_0 \cos(\theta)}$$

$$\rho_{0-TM} = \frac{\eta \cos(\theta) - \eta_0 \cos(\theta_0)}{\eta \cos(\theta) + \eta_0 \cos(\theta_0)}$$

Wall transmission

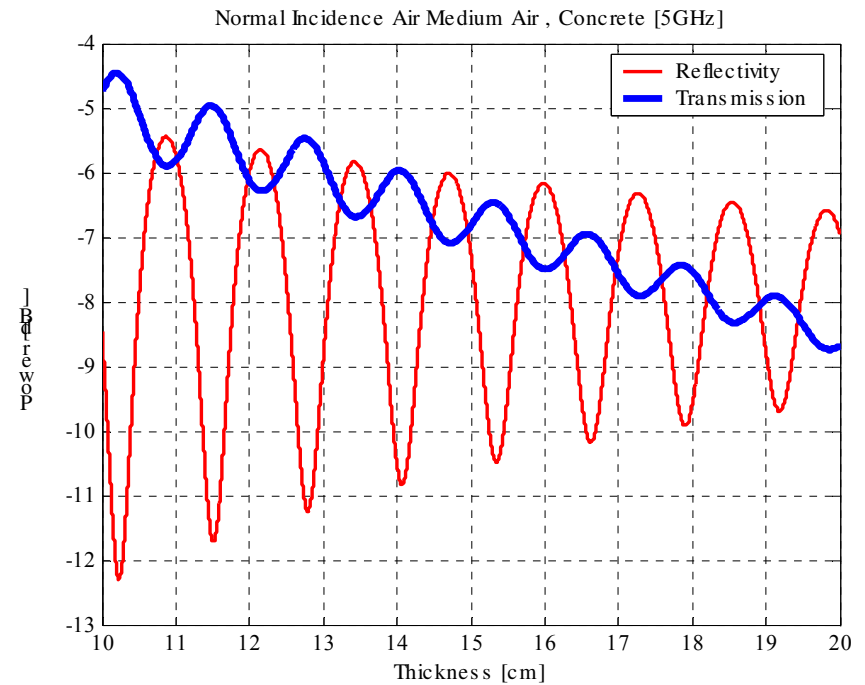
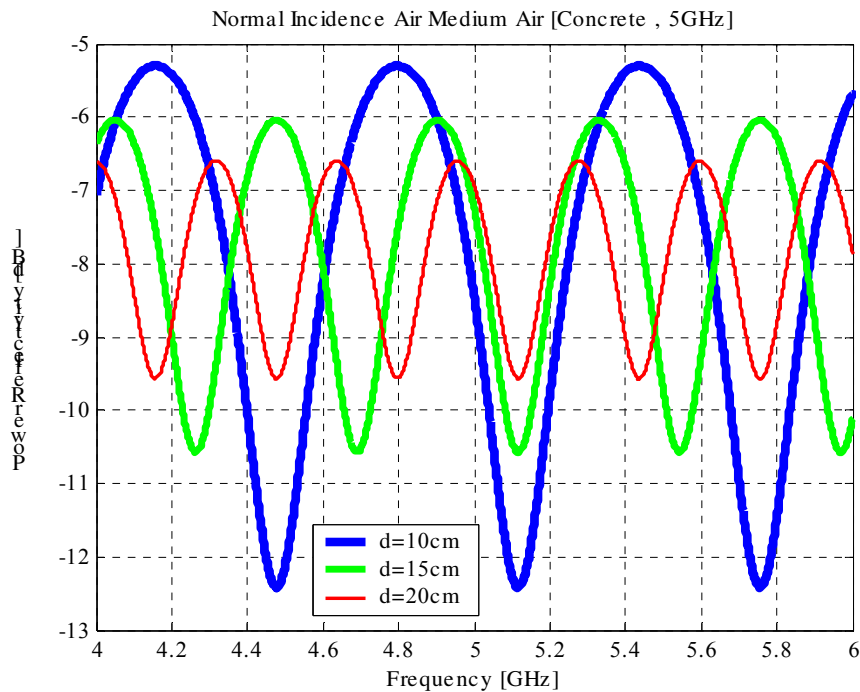
Fabry-Perot effect

$$\begin{aligned}\tau &= \left(1 - \rho_0^2\right) e^{-jk_z(f)d} \sum_{i=0}^{\infty} \left[\rho_0^2 e^{-j2k_z(f)d} \right]^i = \\ &= \frac{\left(1 - \rho_0^2\right) e^{-jk_z(f)d}}{1 - \rho_0^2 e^{-j2k_z(f)d}} = \frac{\left(1 - \rho_0^2\right) e^{-(\alpha + j\beta)\cos(\theta)d}}{1 - \rho_0^2 e^{-2(\alpha + j\beta)\cos(\theta)d}}\end{aligned}$$

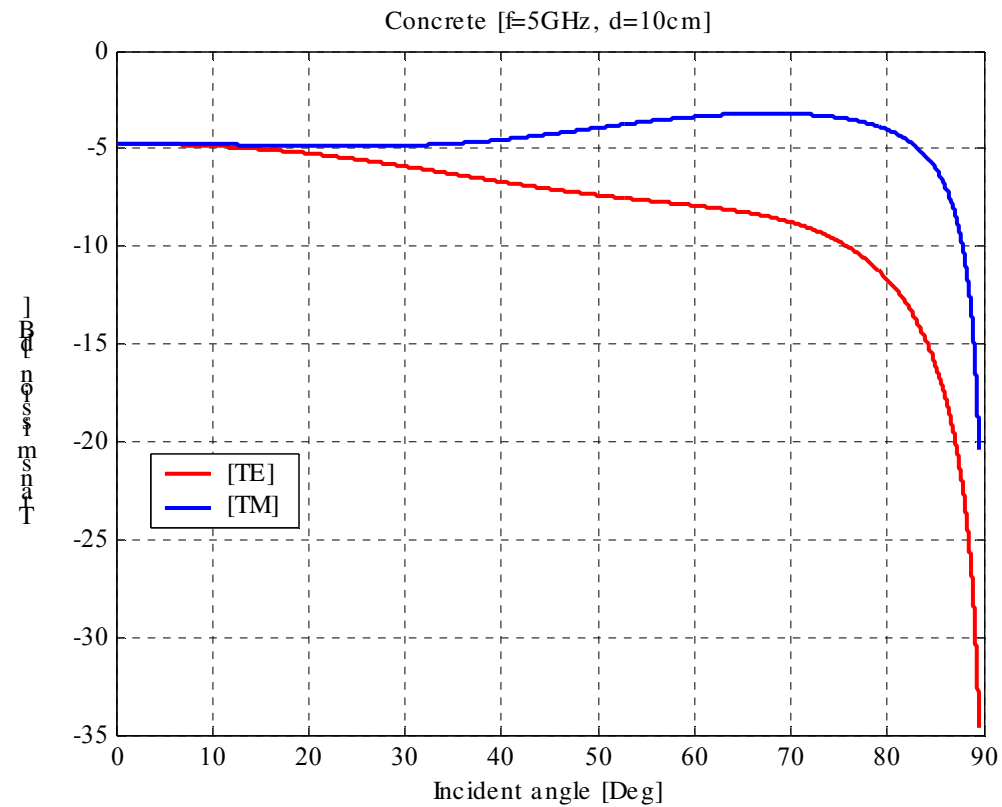
$$|\tau|^2 = \frac{\left(1 - \rho_0^2\right)^2 e^{-2\alpha\cos(\theta)d}}{\left[1 - \rho_0^2 e^{-2\alpha\cos(\theta)d}\right]^2 + 4\rho_0^2 e^{-2\alpha\cos(\theta)d} \sin^2[\beta\cos(\theta)d]}$$

Transmission concrete – 5GHz

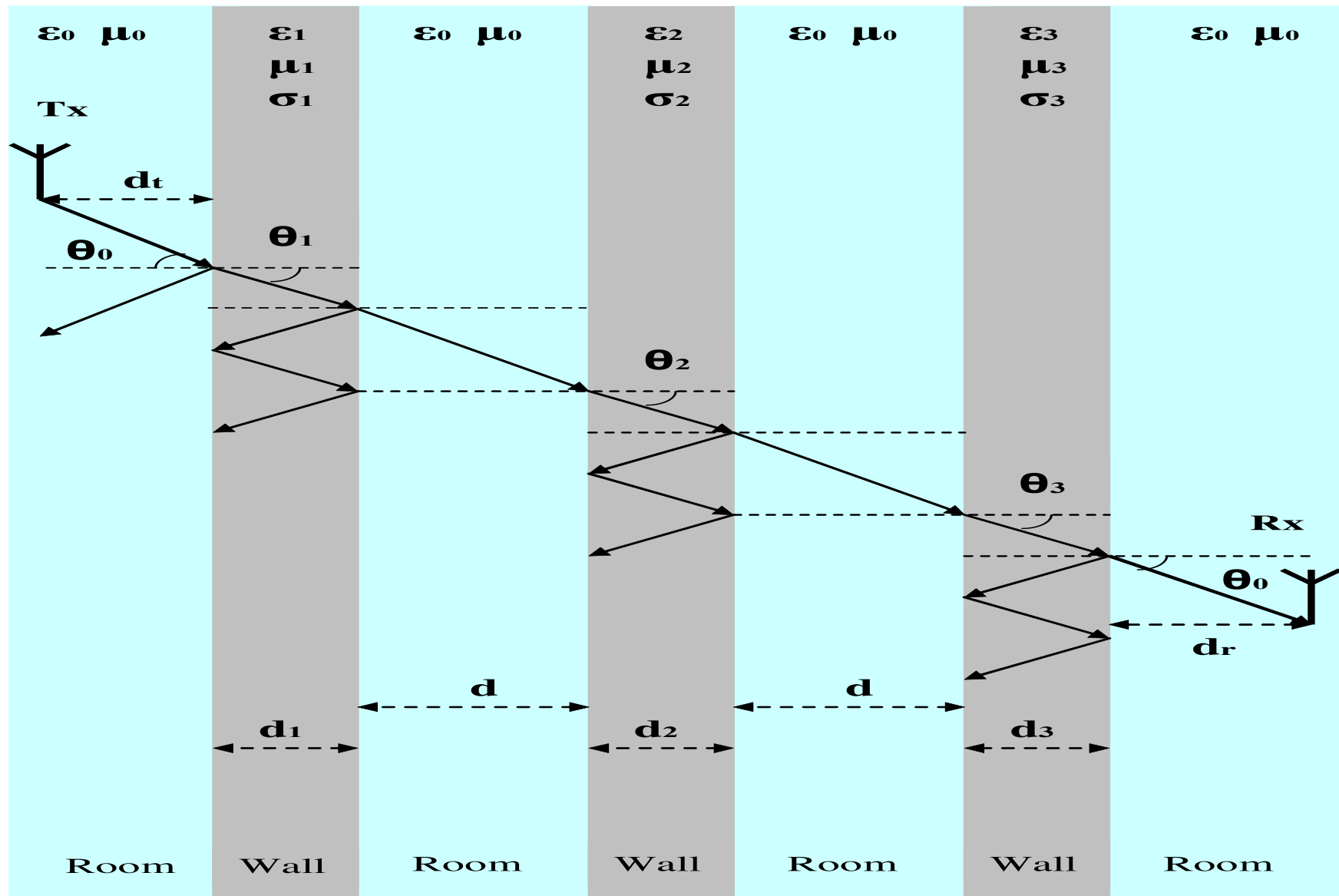
Normal incidence



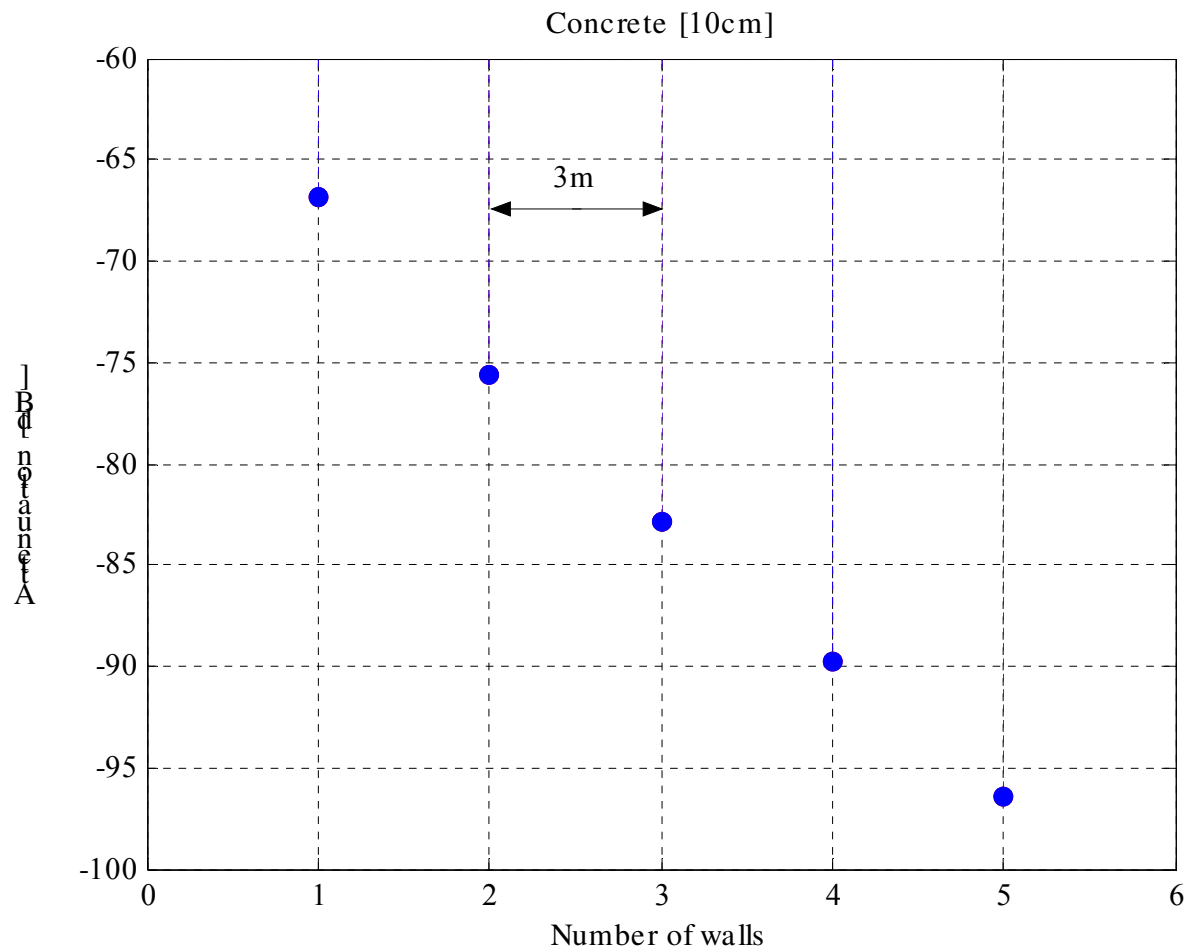
Transmission 10cm concrete 5GHz



Multi-room



Multi-wall attenuation



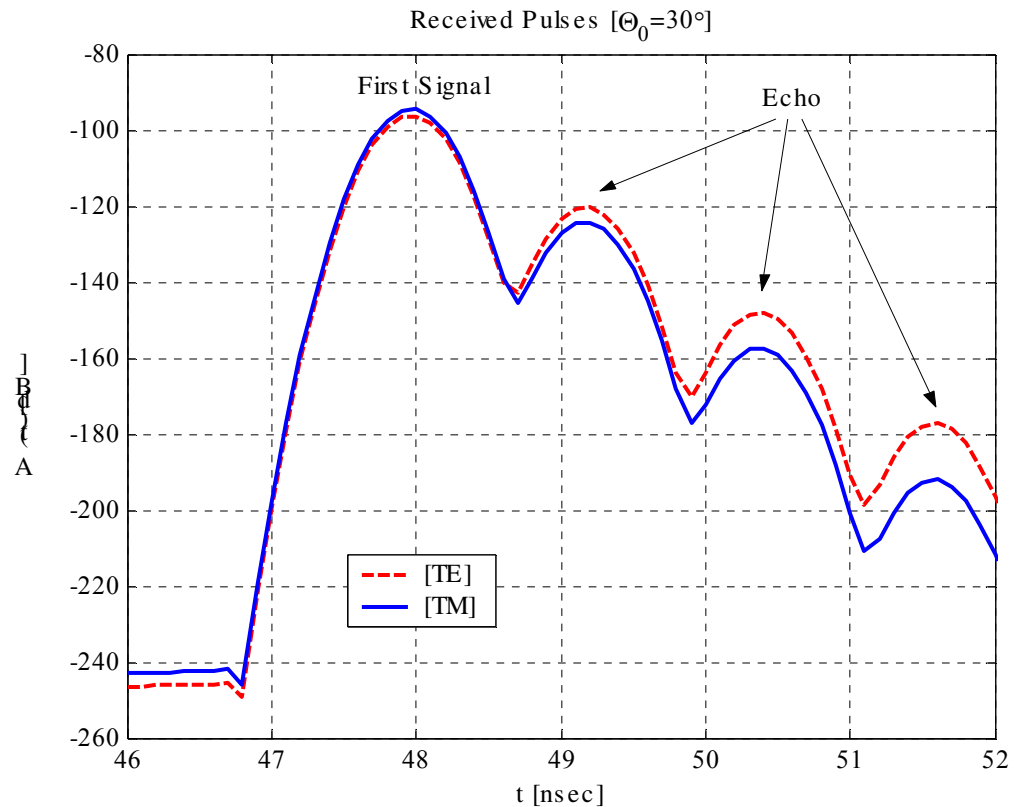
Propagation between 4 rooms

$$d_t = d_r = 2\text{m}$$

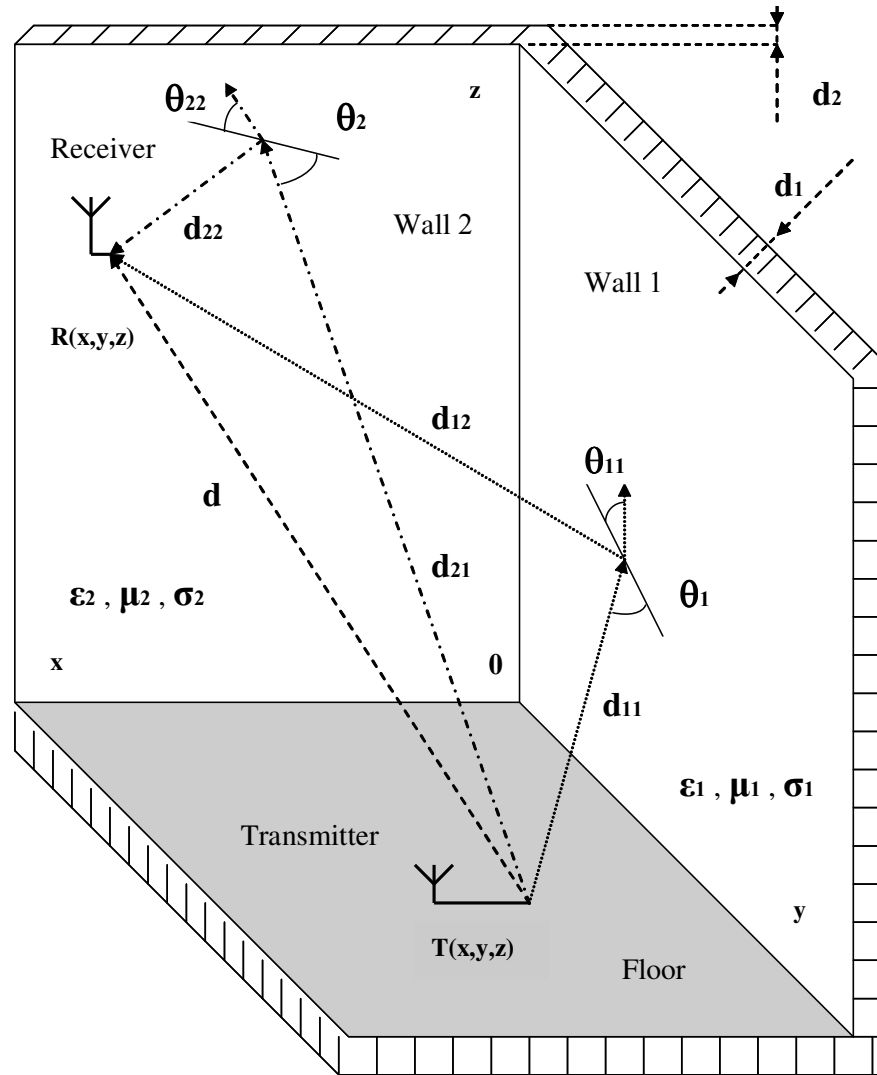
$$d_{12} = d_{23} = 4\text{m}$$

$$d_1 = d_2 = d_3 = 10\text{cm}$$

Wall 1 – Brick Wall [10 cm]
Wall 2 – Brick Wall [10 cm]
Wall 3 – Brick Wall [10 cm]



Multi-path

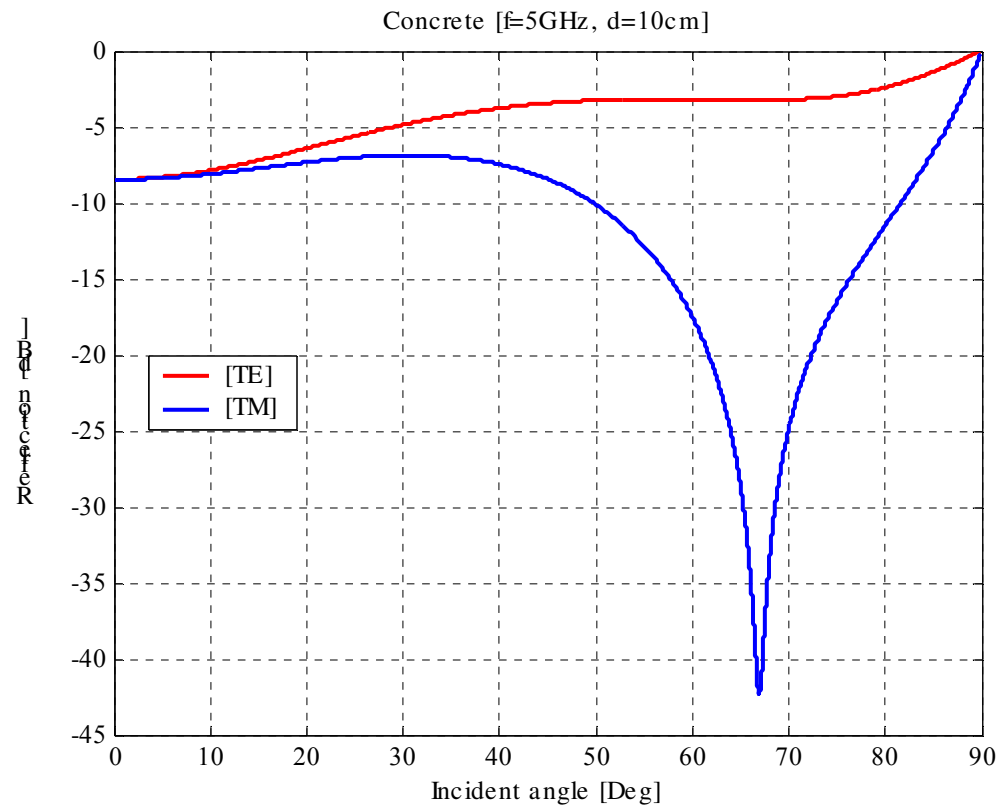


Wall reflections

$$\rho = \rho_0 \left\{ 1 - \left[\left(1 - \rho_0^2 \right) e^{-j2k_z(f)d} \sum_{i=0}^{\infty} \left[\rho_0^2 e^{-j2k_z(f)d} \right]^i \right\} =$$
$$= \rho_0 \cdot \frac{1 - e^{-j2k_z(f)d}}{1 - \rho_0^2 e^{-j2k_z(f)d}} = \rho_0 \cdot \frac{1 - e^{-2(\alpha + j\beta)\cos(\theta)d}}{1 - \rho_0^2 e^{-2(\alpha + j\beta)\cos(\theta)d}}$$

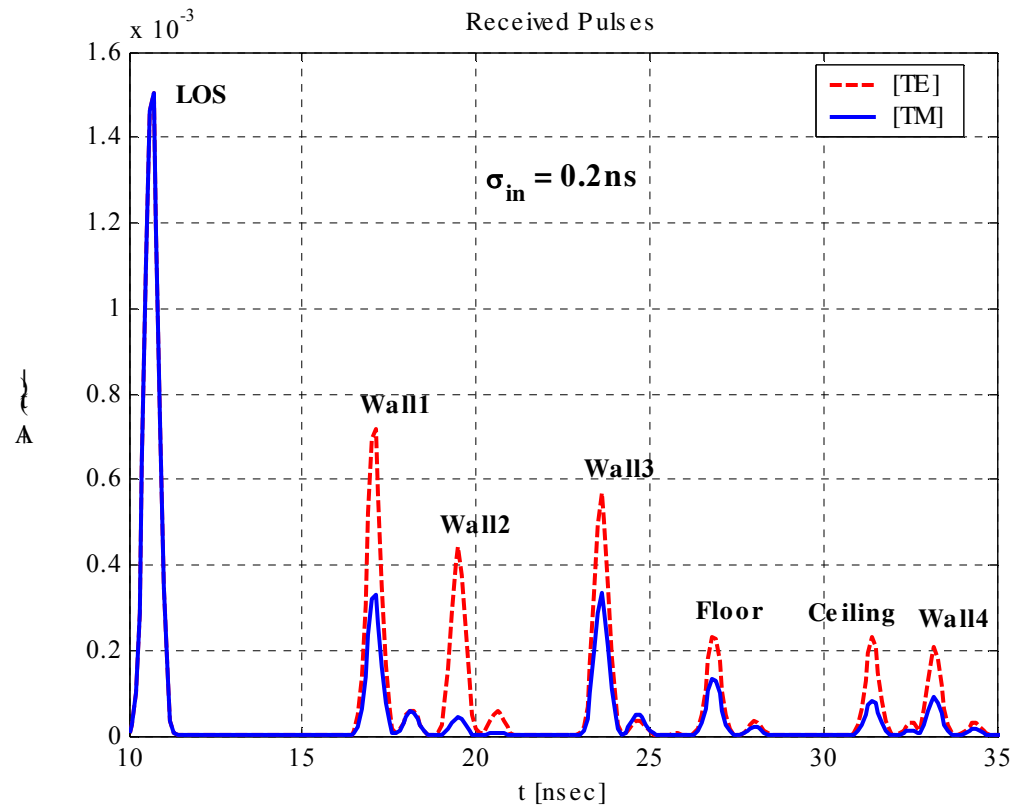
$$|\rho|^2 = \rho_0^2 \cdot \frac{\left[1 - e^{-2\alpha\cos(\theta)d} \right]^2 + 4e^{-2\alpha\cos(\theta)d} \sin^2[\beta\cos(\theta)d]}{\left[1 - \rho_0^2 e^{-2\alpha\cos(\theta)d} \right]^2 + 4\rho_0^2 e^{-2\alpha\cos(\theta)d} \sin^2[\beta\cos(\theta)d]}$$

Reflection 10cm concrete 5GHz



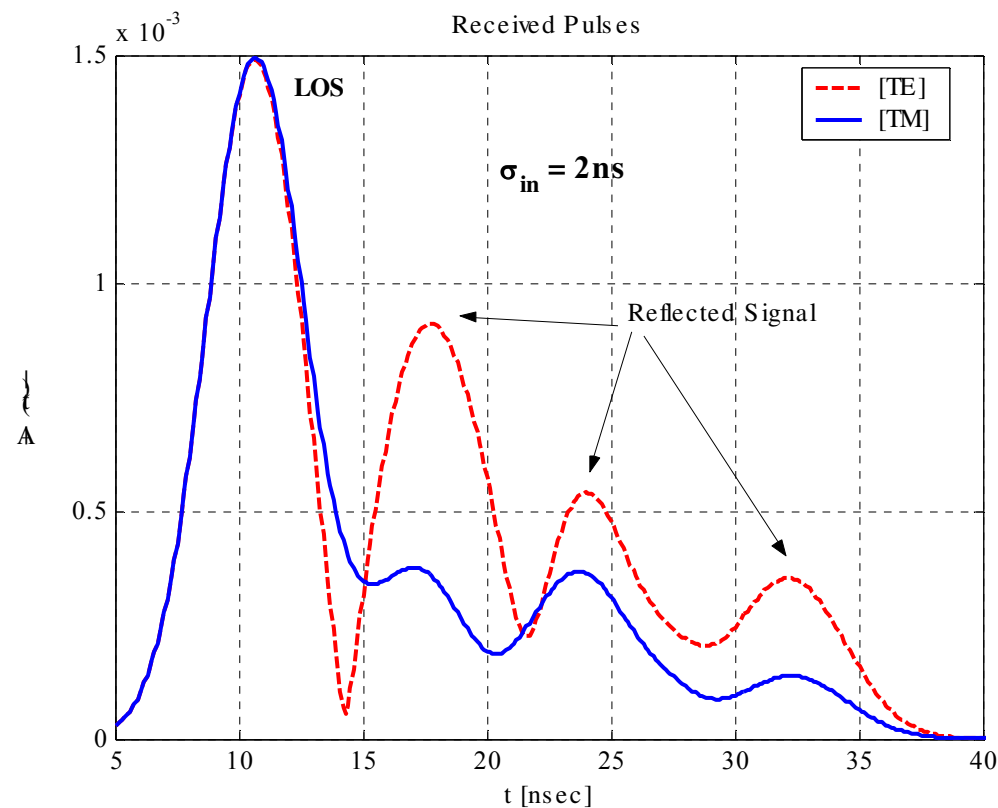
0.2nS Pulse, 10cm Brick walls

	Room size	Transmitter location	Receiver location
x [m] length	6	1	4
y [m] width	4	2	3
z [m] height	3	1	1.5

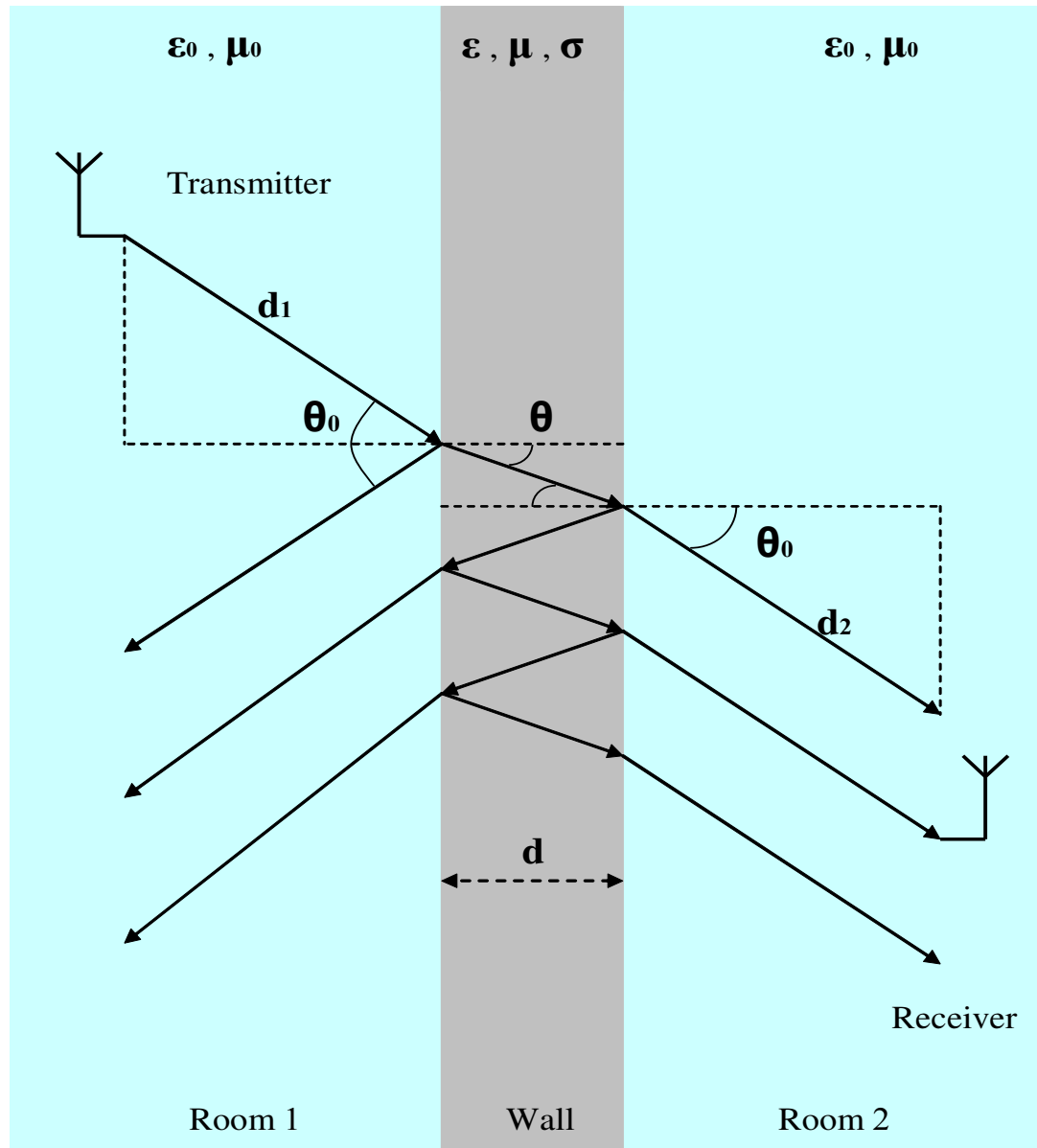


2nS Pulse, 10cm Brick walls

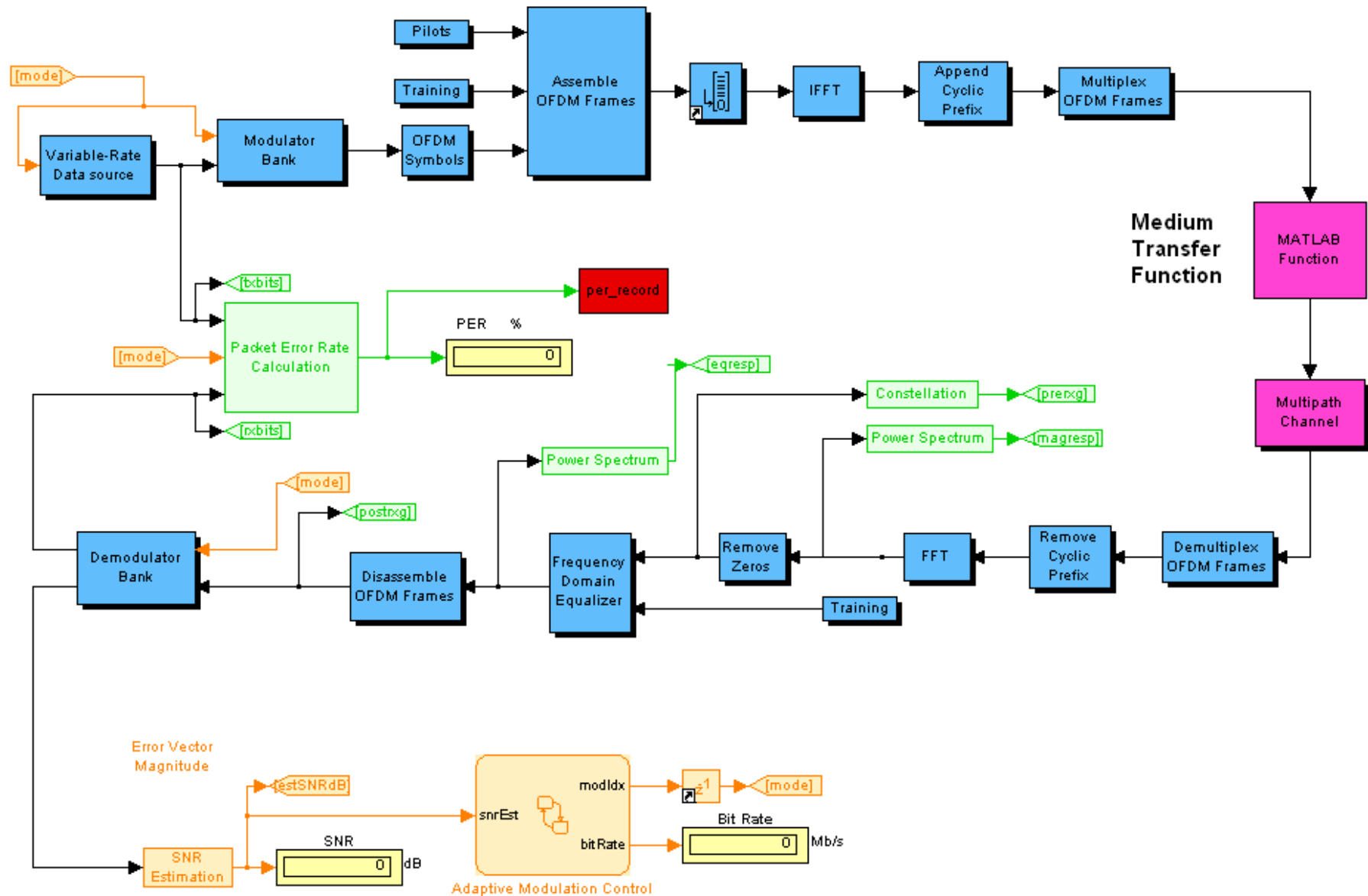
	Room size	Transmitter location	Receiver location
x [m] length	6	1	4
y [m] width	4	2	3
z [m] height	3	1	1.5



Transmission through a single wall



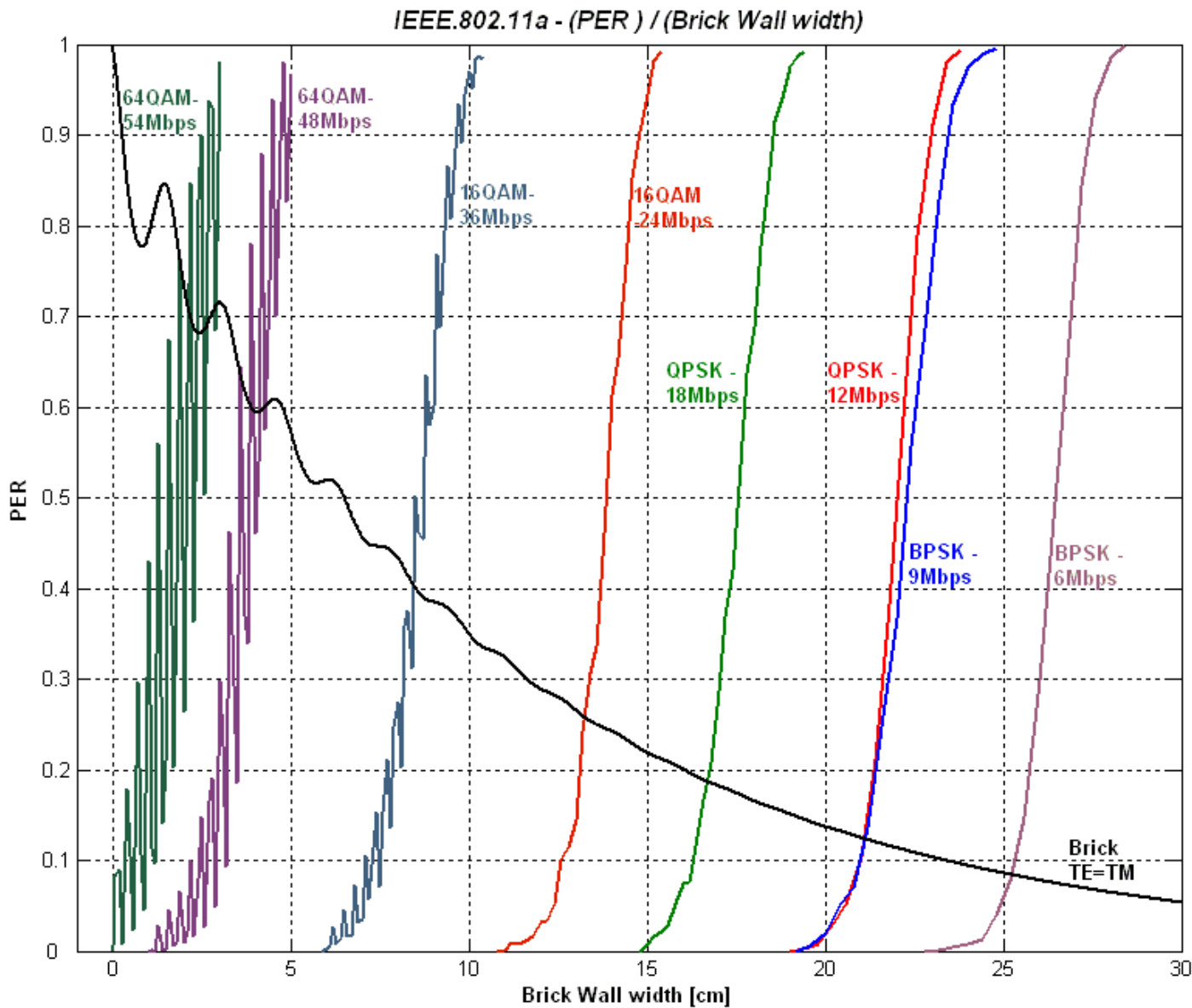
IEEE 802.11a Simulator Including “Medium Transfer Function”



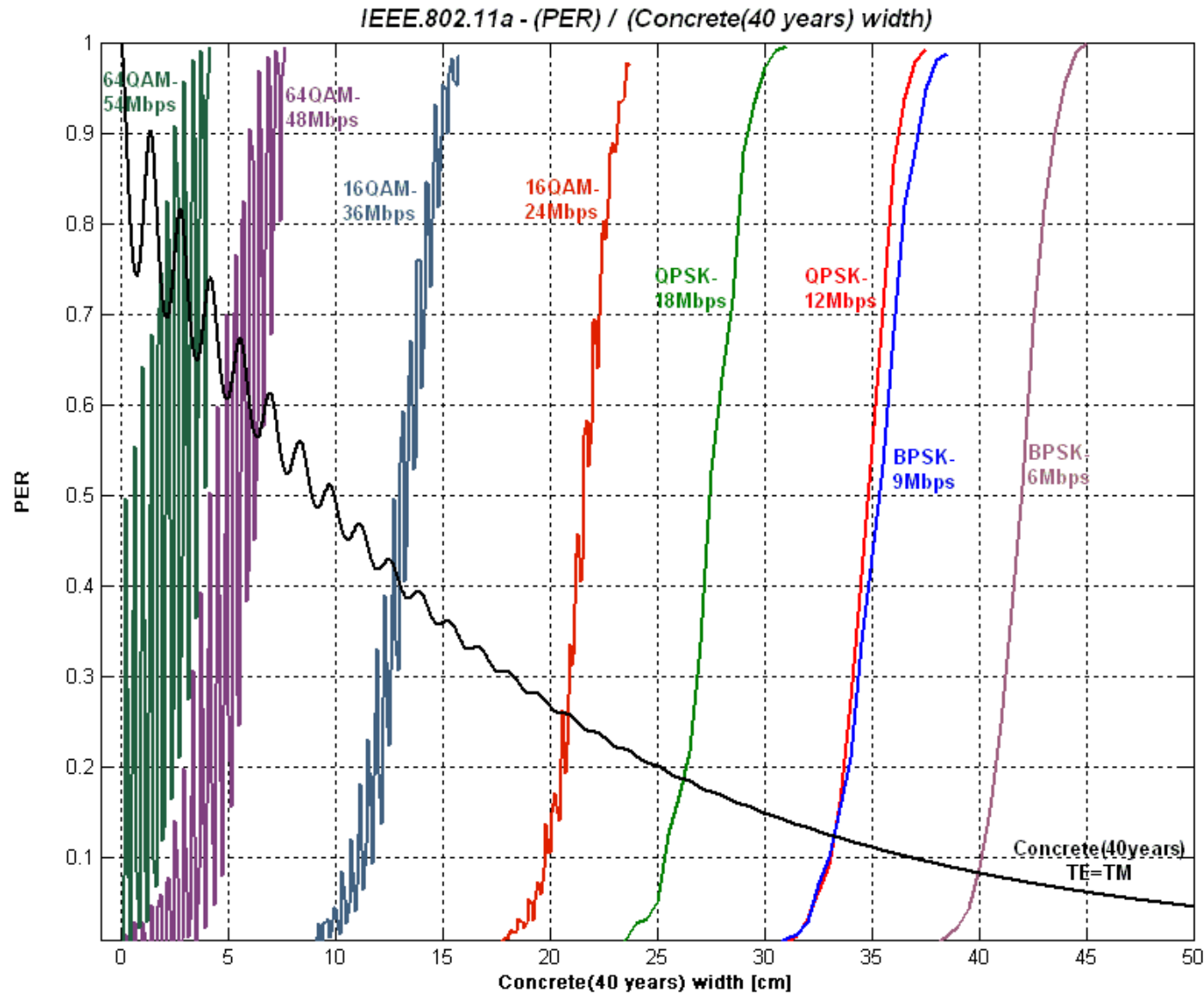
Simulation Parameters

- Incident wave angle = 0°
- Channel SNR = 23 dB
- Symbol Period = 0.08×10^{-6} [sec]
- Number of OFDM symbol per tx block = 20

Brick Wall - Packet Error Rate



Concrete (40 year) - Packet Error Rate



Summary Table

Modulation	Medium	PER=1 %	PER=10 %	PER=50 %	PER=90 %
64QAM-54MBPS	Concrete	< 0.42	< 1.86	< 3.9	4.3
	Brick Wall	< 0.35	< 1.2	< 2.37	< 3
64QAM-48MBPS	Concrete	< 3.5	< 4.78	< 6.58	< 7.45
	Brick Wall	< 2.05	< 3.26	< 4.08	< 4.95
16QAM-36MBPS	Concrete	< 10.16	< 11.72	< 13.37	< 14.92
	Brick Wall	< 6.37	< 7.58	< 8.75	< 9.82
16QAM-24MBPS	Concrete	< 18.0	< 19.94	< 21.53	< 23.18
	Brick Wall	11.52	12.62	13.93	14.81
QPSK-18MBPS	Concrete	23.51	25.35	27.44	29.4
	Brick Wall	15.14	16.34	17.52	18.55
QPSK-12MBPS	Concrete	31.25	33.02	34.85	36.39
	Brick Wall	19.81	21	22.3	23.45
BPSK-9MBPS	Concrete	31	33.01	35.27	37.18
	Brick Wall	19.7	20.05	22.34	23.52
BPSK-6MBPS	Concrete	38.15	40.24	41.98	43.52
	Brick Wall	24.31	25.36	26.57	27.43

Year 4-6 Program

- Adding materials to the library.
- Inclusion of multi-reflection from adjacent rooms.
- Extension of our model to the MIMO (multiple antenna polarizations) UWB.
- Propagation model for 802.11n including MIMO.
- Simulation of signal reflections from furniture and moving personnel.
- Analytical validations of experimental results.

Year 4 Program

6.3.1 פרט את המשימות הספציפיות המהוות את תכנית העבודה לשנה הנוכחית וכן המשאבים הנדרשים לביצוען (המשימות אמורות להיות פעילויות שמסתיימות בתוצרים מוגדרים (deliverables). יש להימנע מתיאורים כלליים כגון: תכנון, ביצוע, וכו'). יש לפרט מקסימום 20 פעילויות, לתקופת המו"פ המבוקשת בבקשה זו.
בנוסף יש לצרף גם תרשים גנט, המפרט את תכנית העבודה.

#	פעילות/משימה (כולל קבלני משנה)	משך המשימה בחודשים	מועד סיומה	שנות אדם*	עלות כוללת (אלפי ש"ח) *
1	הרחבת המודל כך שיכלול חומרים נוספים וכן החזרות מרובות גם מחדרים סמוכים בנוסף להחזרות דרך קירות עבור אותות רחבי סרט (בשיתוף חברת אלביט).	12	30.4.2008	0.2	37
2	הרחבת המודל לערוצי MIMO מרובי אנטנות בשלושה קיטובים שונים. העבודה תתבצע בשיתוף חברת אלביט ומטלינק.	12	30.4.2008	0.2	37
3	בחינה של התאמת המודל הוספת טיפול בערוצי OFDM בכלל אלה מרובי אנטנות MIMO המוגדרים על ידי תקן 802.11n. בשיתוף חברת מטלינק.	12	30.4.2008	0.1	19

6.3.2 לכל אחת מהמשימות שמופיעות ברשימה לעיל יש לתאר את הפעילויות הנדרשות להשגתה , ברמת פירוט שתאפשר לבדוק המקצועי לשפוט את סבירות היקף המשאבים הנדרשים :שנות אדם והעלות הכוללת למשימה.

1 הרחבת המודל כך שיכלול חומרים נוספים והחזרות מרובות גם מחדרים סמוכים בנוסף להחזרות דרך קירות עבור אותות רחבי סרט (בשיתוף חברת אלביט). הפעילות הנדרשת הוספת איברים מסדר גבוה יותר למודל שפיתחנו.	
2 הרחבת המודל לערוצי MIMO מרובי אנטנות בשלושה קיטובים שונים. כאן המקום לציין שהמודל שפיתחנו בתחום התדר ניתן להרחבה טבעית על מנת לכלול שידור וקליטה של אותות רחבי סרט ממספר אנטנות. העבודה תתבצע בשיתוף חברת אלביט ומטלינק.	
3 בחינה של התאמת המודל לטיפול בערוצי OFDM בכלל אלה מרובי אנטנות MIMO המוגדרים על ידי תקן 802.11n . בשיתוף חברת מטלינק. הפעולה העיקרית היא הוספת מודל הערוץ שלנו לסימולטור ערוץ מרובה אנטנות MIMO ושימוש במודל לחישוב ההשפעות בשיטת תקשורת OFDM. נדרש יהיה לשלב את תמסורת הערוץ שפיתחנו וסימולטור התקן 802.11n . זאת בדומה לתהליך שביצענו עבור התקן 802.11a כמתואר לעיל.	

6.3.3 פרט אבני דרך ניתנות למדידה לתוכנית כולה (כגון: תוצרים, מוצרי ביניים, או הישגים הנדסיים ברורים) יש להגדיר לפחות שתי אבני דרך לשנה זו.

#	פעילות/אבני דרך	מועד סיומה	תאור ההישג באבן הדרך
1	הרחבת המודל כך שיכלול חומרים נוספים והחזרות מרובות גם מחדרים סמוכים בנוסף להחזרות דרך קירות עבור אותות רחבי סרט.	30.4.2008	מודל לתקשורת רחבת סרט UWB הכולל רב נתיב והדים מקירות מבנה סגור.
2	הרחבת המודל לערוצי MIMO מרובי אנטנות בשלושה קיטובים שונים.	30.4.2008	מודל <u>רחב סרט</u> לערוץ תקשורת MIMO !!!
3	בחינת התאמת המודל לטיפול בערוצי OFDM בכלל אלה מרובי אנטנות MIMO המוגדרים על ידי תקן 802.11n.	30.4.2008	התאמת המודל לסימולטור Indoor לערוץ OFDM הפועל במבנה לתקן 802.11n (בדומה לזה שפיתחנו עבור התקן 802.11a).

זוכנית עבודה בנושא מודל ערוץ וסימולטור ערוץ

רקע

מודל ערוץ הינו כלי המאפשר לבחון ארכיטקטורות מימוש שונות בסימולציה ולקבל תוצאות הנשענות על מודל קרוב למציאות עבור ערוצי MIMO וערוצים רחבי סרט מדודים. עד לתחילת פעילות המאגד הייתה יכולת סימולטיבית לניתוח סביבת התפשטות לאות צר סרט בלבד.

תקציר הישגים בסיום פאזה ראשונה (ראה פירוט במסמך ההצדקה עמ' 30-31)

- בוצעו מדידות ערוצים בתווך אמיתי ונבנה על בסיס המדידות מודל ערוץ 3×2 .
- פותחה יכולת סימולטיבית לניתוח התפשטות אות רחב סרט, כאמצעי לאיפיון מערכת האנטנות הנדרשת בסוג סביבה נתון.
- פותח מודל התפשטות לערוץ רחב סרט הכולל השפעות של החומרים הדיאלקטריים מהם בנויים הקירות על העברה, החזרה ורב-נתיב בתקשורת UWB בפולסים אולטרה-קצרים.

מטרות ויעדים לפאזה הבאה

במסגרת תוכנית העבודה תבוצע הרחבת מודל התפשטות רחב-סרט לערוצי UWB כך שיכלול ריבוי אנטנות (4×4) בשידור ובקליטה בתצורת MIMO וכן לערוץ רחב סרט. ובנוסף תבוצע הוספת החזרים מעצמים ניחים בחדר ומבני אדם הנעים בו. כמוכן, תבוצע הכלת מודל התפשטות דרך קירות על שיטות קידוד כגון OFDM המוגדר על ידי תקן 802.11n

חברה מובילה: מטלינק

חברות משתתפות: פולטיקום, אלביט, טלמטיקס, ויביון,

אקדמיות צפויות: פרופ' היימן, פרופ' לויתן, פרופ' פינחס, מעבדה בטכניון, ד"ר פורת (האוברסיטה העברית).

4. את נושא האנטנות (עמ' 67) – המופיע במסגרת פירוט הפעילויות בחתכים

השונים:

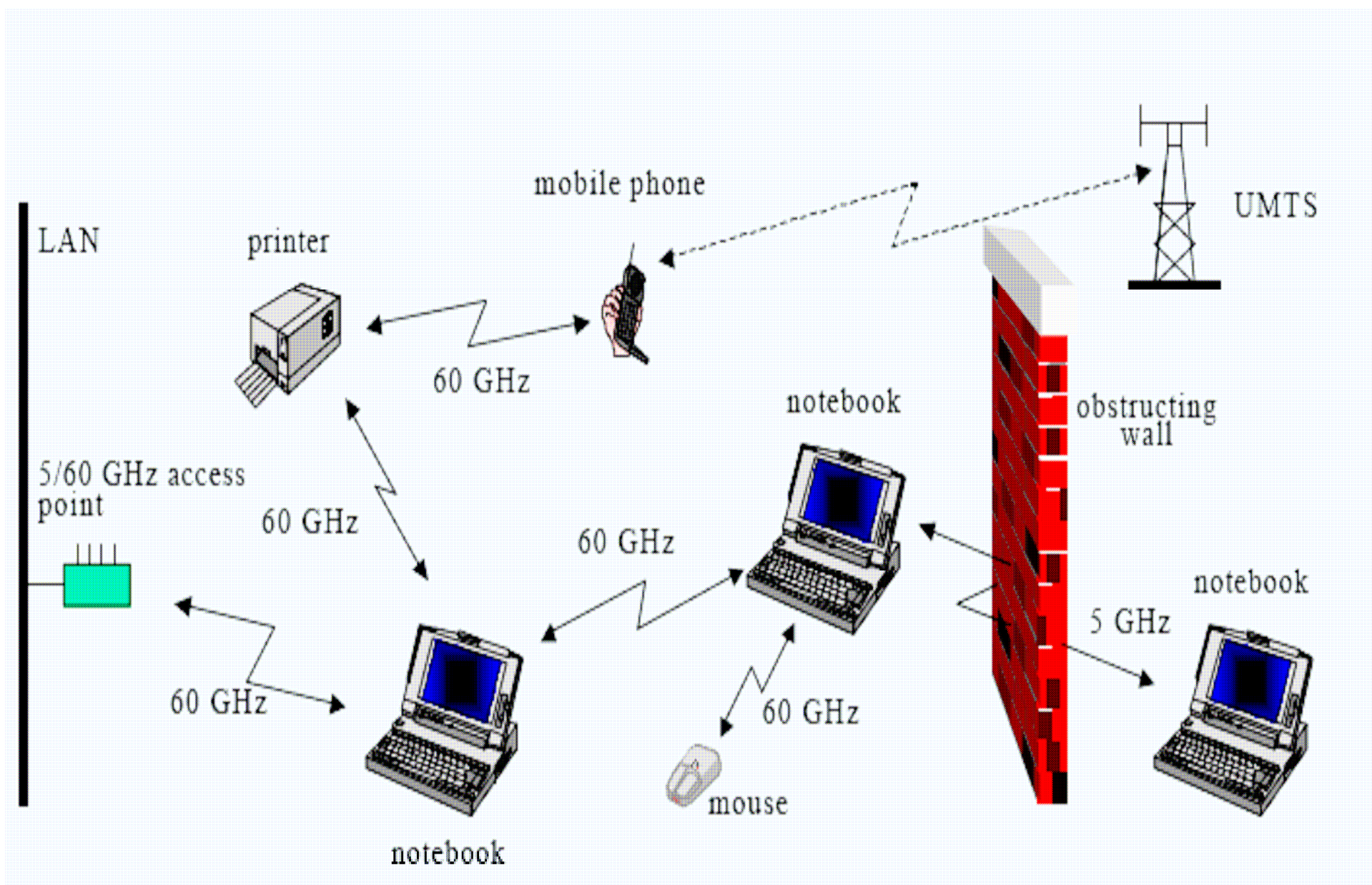
א. אני מצייע להרחיב ל'אנטנות ומודל התפשטות'.

ב. להוסיף הפעילויות הבאות:

- הרחבת מודל התפשטות רחב-סרט לערוצי UWB כך שיכלול ריבוי אנטנות בשידור ובקליטה בתצורת MIMO.
- הוספת החזורים מעצמים נייחים בחדר ומבני אדם הנעים בו.
- הכלת מודל התפשטות דרך קירות על שיטות קידוד כגון OFDM המוגדר על ידי תקן 802.11n.

בברכה,

יוסי פנחסי.



FOURIER TRANSFORM 'PHASOR'

$$\mathbf{E}(r, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} E(r, t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt$$

$$\tilde{E}(r, t) = E(r, t) + j\hat{E}(r, t)$$

$$\hat{E}(r, t) = \frac{1}{\pi t} * E(r, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{E(r, t')}{\pi(t - t')} dt'$$

$$\tilde{\mathbf{E}}(r, f) = \begin{cases} 2\mathbf{E}(r, f) & f > 0 \\ 0 & f < 0 \end{cases}$$

INVERSE FOURIER TRANSFORM

$$\mathbf{E}(r, f) = \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{E}}(r, f) + \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{E}}^*(r, -f)$$

$$E(r, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{E}(r, f) \cdot e^{+j2\pi ft} df =$$

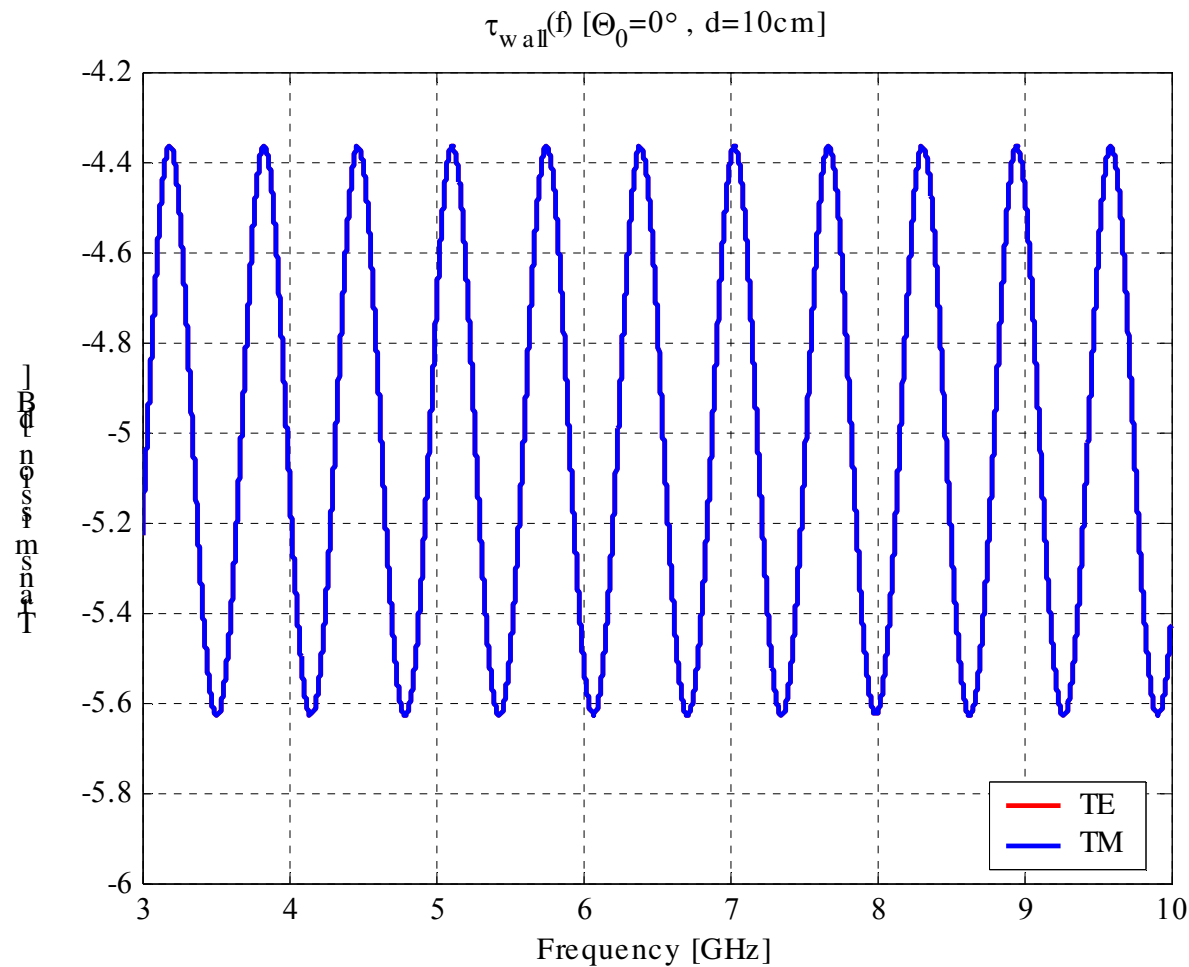
$$= \operatorname{Re} \int_0^{\infty} \tilde{\mathbf{E}}(r, f) \cdot e^{+j2\pi ft} df$$

MATERIALS	5 GHz			
	Relative Permittivity			
	Real	Imaginary	Conductivity	Tangent loss
	ϵ'	ϵ''	σ	$\tan(\delta)$
Brick (made of chalk, with holes)	4.12	0.16	4.45E-02	3.88E-02
Brick (without holes)	3.3	0.01	2.78E-03	3.03E-03
Brick wall	3.56	0.34	9.46E-02	9.55E-02
Concrete (one year)	5.5	0.18	5.01E-02	3.27E-02
Concrete (40 years)	4.6	0.24	6.68E-02	5.22E-02
Wood (a)	2.05	0.296	8.23E-02	1.44E-01
Wood (b)	1.65	0.235	6.54E-02	1.42E-01
Plasterboard	2.02	0.05328	1.48E-02	2.64E-02
Chipboard	2.88	0.4879	1.36E-01	1.70E-01
Glass	5.98	1.0764	2.99E-01	1.80E-01

MATERIALS	60 GHz			
	Relative Permittivity			
	Real	Imaginary	Conductivity	Tan loss
	ϵ'	ϵ''	σ	$\tan(\delta)$
Brick (made of chalk, with holes)	3.95	0.073	2.44E-01	1.85E-02
Brick (without holes)	3.26	0	0.00E+00	0.00E+00
Concrete (one year)	6.4954	0.4284	1.43E+00	6.60E-02
Concrete (50 mm)	11.47	0.29593	9.88E-01	2.58E-02
Aerated Concrete	2.26	0.1017	3.39E-01	4.50E-02
Aerated Concrete (50mm)	3.66	0.12481	4.17E-01	3.41E-02
wood	1.5	0.09	3.00E-01	6.00E-02
wood	1.64	1.115	3.72E+00	6.80E-01
Plain wood (19mm, 1 layer)	2.0687	0.41388	1.38E+00	2.01E-01
Plain wood (19mm, 2 layer)	1.9515	0.3683	1.23E+00	1.89E-01
Plasterboard (5mm, 1 layer)	2.4845	0.06211	2.07E-01	2.50E-02
Plasterboard (5mm, 2 layer)	1.8427	0	0.00E+00	0.00E+00
Plasterboard (5mm air gap, 1 layer)	2.541	0.61179	2.04E+00	2.41E-01
Plasterboard (5mm air gap, 2 layer)	2.1333	0.00299	9.98E-03	1.40E-03
Plasterboard	2.6	0.0364	1.21E-01	1.40E-02
Plasterboard	3.08	0.05544	1.85E-01	1.80E-02
Plasterboard (9mm)	2.37	0.12012	4.01E-01	5.07E-02
Plasterboard (12mm)	2.7	0.05346	1.78E-01	1.98E-02
Chipboard	2.78	0.1362	4.55E-01	4.90E-02
Chipboard	3.15	0.1795	5.99E-01	5.70E-02
Chipboard (22mm, wood)	2.85	0.15875	5.30E-01	5.57E-02
Thermolite block (100mm, 1 layer)	2.9396	0.2725	9.10E-01	9.27E-02
Thermolite block (100mm, 2 layer)	4.9913	0.32094	1.07E+00	6.43E-02
Ceiling board (8.8mm, rock wool)	1.5876	0.0126	4.21E-02	7.94E-03
Floor board (24.8mm, synthetic resin)	3.9135	0.32868	1.10E+00	8.40E-02
Stone	6.72	0.0336	1.12E-01	5.00E-03
Stone	8.55	0.5643	1.88E+00	6.60E-02
Marble	11.56	0.08092	2.70E-01	7.00E-03
Tiles	4.01	0.09223	3.08E-01	2.30E-02
Tiles	8.58	0.7807	2.61E+00	9.10E-02
Clear glass (4mm, 1 layer)	2.9591	0.00041	1.37E-03	1.38E-04
Clear glass (4mm, 2 layer)	6.3919	0.00032	1.07E-03	5.00E-05
Meshed glass (5mm, 1 layer)	8.0213	0.00024	8.01E-04	3.00E-05
Meshed glass (5mm, 2 layer)	3.4808	0.57364	1.91E+00	1.65E-01
Glass	4.7	0.1551	5.18E-01	3.30E-02
Glass	6.13	0.50266	1.68E+00	8.20E-02
Acrylic glass	2.52	0.03024	1.01E-01	1.20E-02
Plexiglas	2.76	0.018	6.01E-02	6.52E-03

Transmission concrete – 5GHz

Incident angle = 0



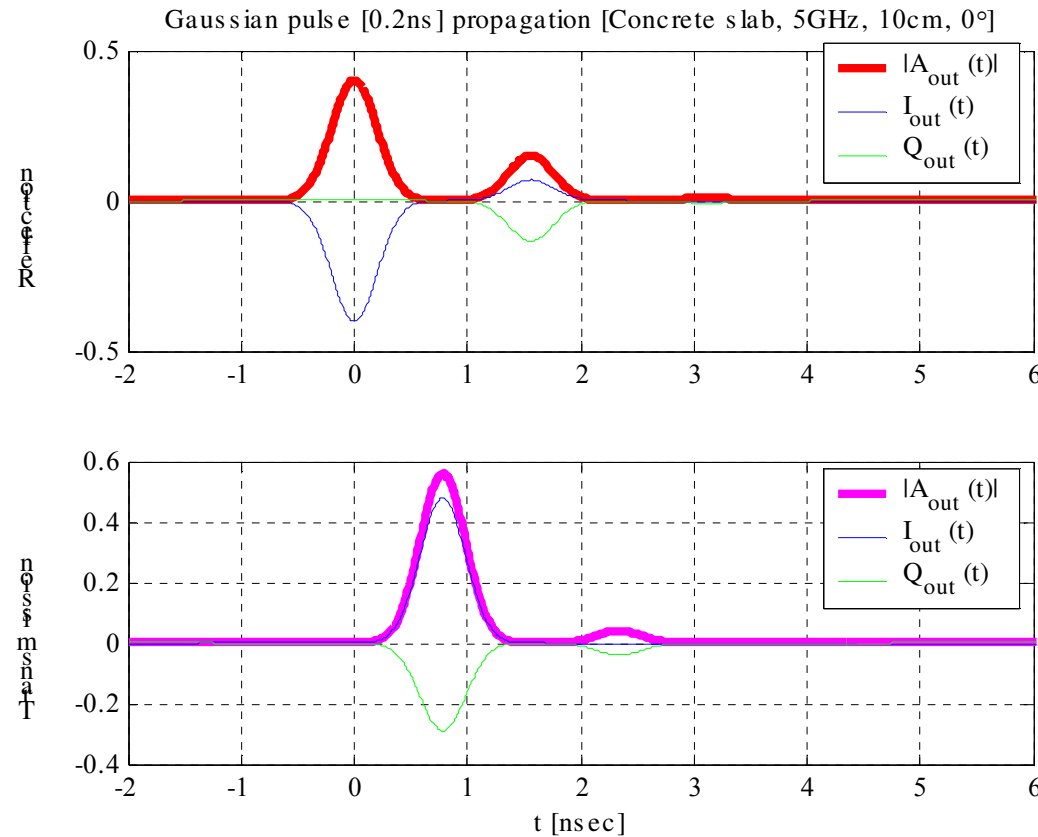
Free-Spectral Range

$$d = 10cm$$

$$n = \sqrt{\varepsilon'} = \sqrt{5.5}$$

$$FSR = \frac{1}{2} \frac{v_g}{d} \cong \frac{1}{2} \frac{c/n}{d} = \frac{1}{2} \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{5.5} \cdot 0.1} \approx 640MHz$$

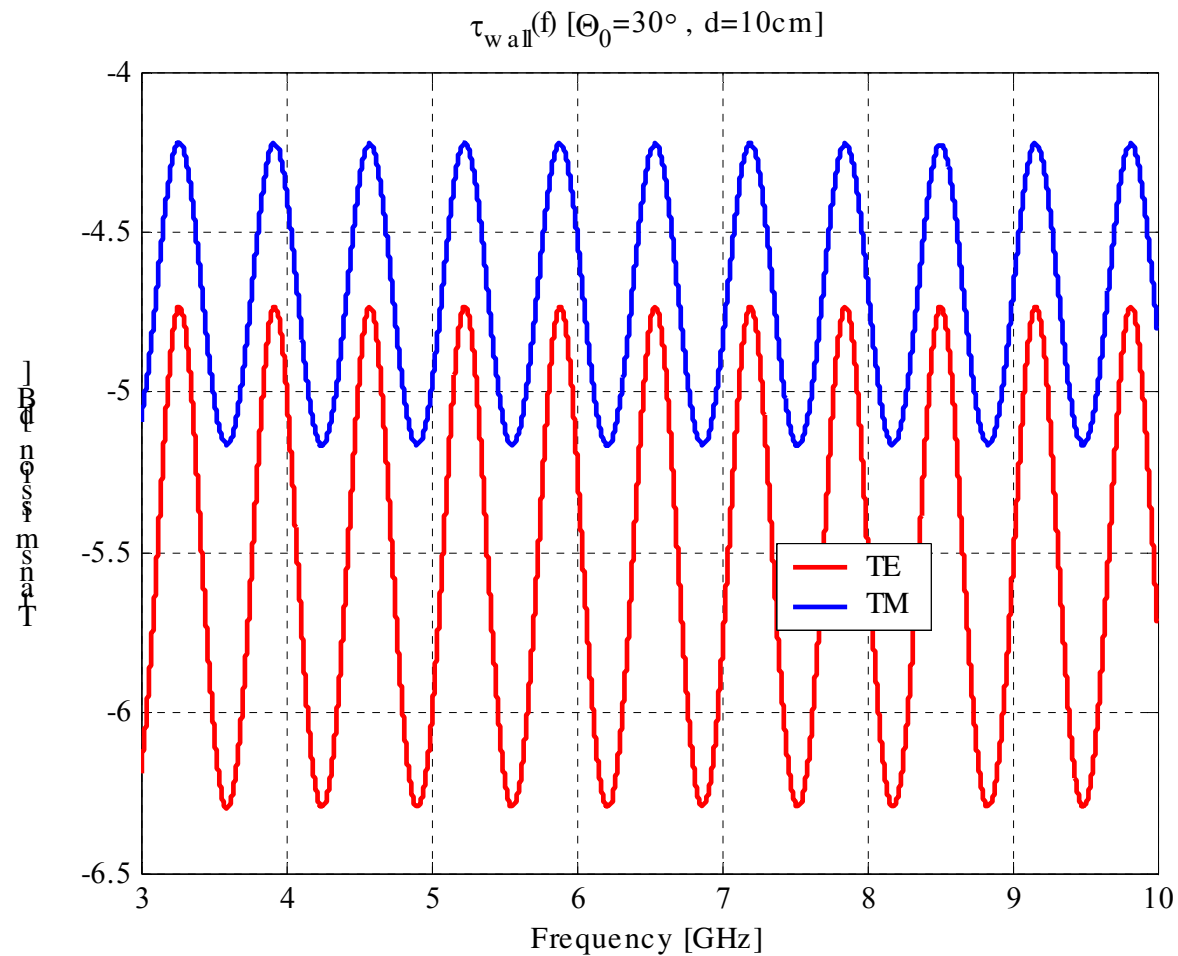
0.2nS pulse, 5GHz, Concrete 10cm



$$t_r = \frac{2d}{v_g} \cong \frac{2d}{c/n} = \frac{2 \cdot 0.1}{3 \cdot 10^8 / \sqrt{5.5}} \approx 1.56 \text{ nS}$$

Transmission concrete – 5GHz

Incident angle = 30



802.11a Simulation structure

