



Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας

Πολυτεχνική Σχολή



Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Εργαστήριο Εφαρμοσμένου & Υπολογιστικού Ηλεκτρομαγνητισμού

Ηλεκτρομαγνητικές Μεταεπιφάνειες

Εφαρμογές σε Ασύρματες Επικοινωνίες

Αλέξανδρος Πιτιλάκης, PhD

<https://users.auth.gr/alexpiti/>

Αλέξανδρος Πιτιλάκης

Εκπαίδευση

- ▶ **Δίπλωμα ΗΜΜΥ – ΑΠΘ 2005**
 - Κατεύθυνση: Τηλεπικοινωνίες
- ▶ **MSc Electrical Engineering – Telecom Paris 2007**
 - Πρακτική: Δίκτυα οπτικών ινών
- ▶ **Διδακτορικό ΗΜΜΥ – ΑΠΘ 2014**
 - Διατριβή: Ολοκληρωμένες φωτονικές διατάξεις υβριδικής τεχνολογίας αγωγού-διηλεκτρικού-πυριτίου



Ακαδημαϊκή και ερευνητική δραστηριότητα

- ▶ **Συμβασιούχος διδάσκοντας – ΤΗΜΜΥ ΠΔΜ και ΑΠΘ (από 2016)**
 - Μαθήματα: Κεραίες & Διάδοση, Φωτονική, Οπτική
- ▶ **Επιστημονικός συνεργάτης / Μεταδιδακτορικός ερευνητής**
 - ΑΠΘ και ΕΜΠ, ΕΚΕΤΑ (ΙΠΤηλ) και ΙΤΕ (ΙΗΔΛ και ΙΠ)
 - Εθνικά και Ευρωπαϊκά ερευνητικά προγράμματα (R&D)



Διάρθρωση Ομιλίας

- ▶ **Ηλεκτρομαγνητικά (ΗΜ) κύματα**
- ▶ **Αλληλεπίδραση ΗΜ κυμάτων με την ύλη**
- ▶ **Μεταϋλικά και μεταεπιφάνειες (ΜΕ)**
- ▶ **Ανάλυση & Σχεδίαση**
- ▶ **Προγραμματιζόμενες ΜΕ**
- ▶ **Εφαρμογές σε ασύρματες επικοινωνίες**
- ▶ **Έρευνα & Ανάπτυξη (R&D)**

Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

Ηλεκτρομαγνητισμός (1)

Εξισώσεις του Maxwell

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

Καταστατικές

$$\mathbf{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \mathbf{E}$$

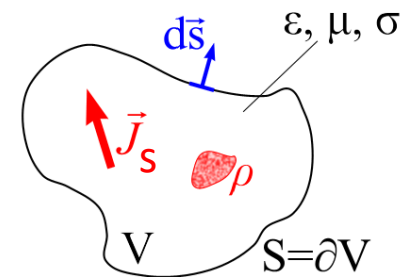
$$\mathbf{B} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H}$$

$$\mathbf{J}_c = \sigma \mathbf{E}$$

ΗΜ ιδιότητες χώρου

$$\epsilon_r, \mu_r, \sigma$$

Χώρος του
«προβλήματος»

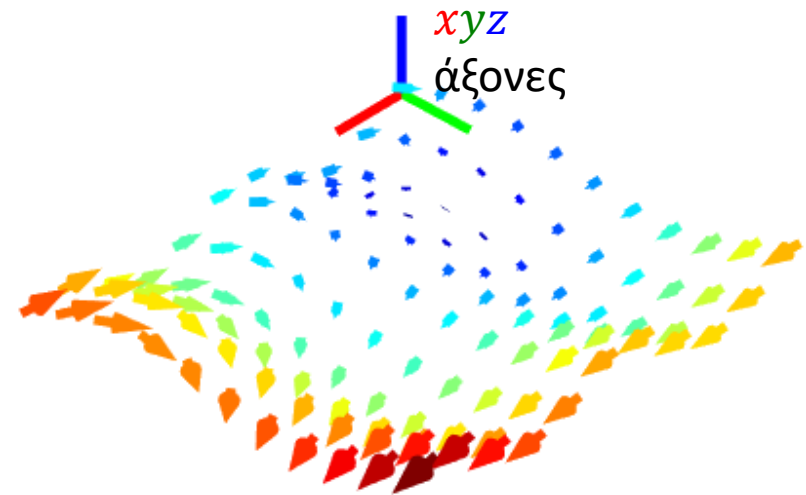


► Παρατηρήσεις

- Τα ΗΜ πεδία είναι διανυσματικά (όχι βαθμωτά)
- Οι μεταβολές (παράγωγοι) είναι και χωρικές (∇) και χρονικές ($\partial/\partial t$)

► Τελικά

- ✓ Αν γνωρίζουμε σε όλο τον 3Δ χώρο τα $\{\epsilon_r, \mu_r, \sigma\}$ και τις «πηγές» (ρ, \mathbf{J}_s) υπολογίζουμε τα Ε- και Η-πεδία

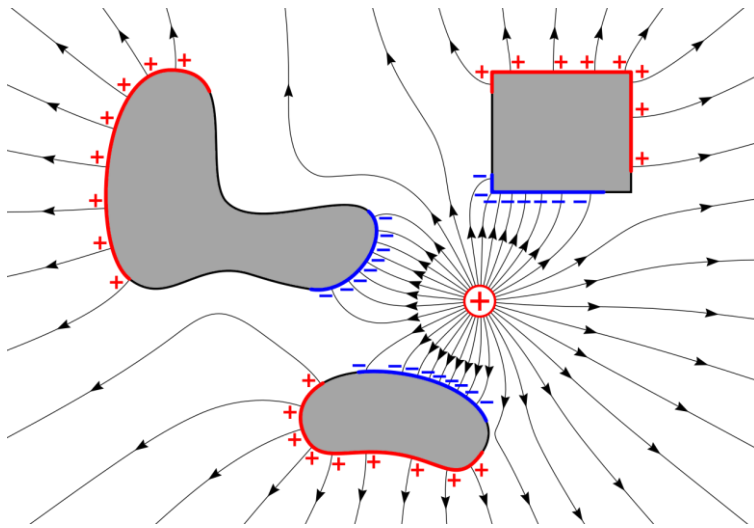


Π.χ. Ένα ΗΜ πεδίο υπολογισμένο σε μία αυθαίρετη (κυματιστή) επιφάνεια.

Ηλεκτρομαγνητισμός (2)

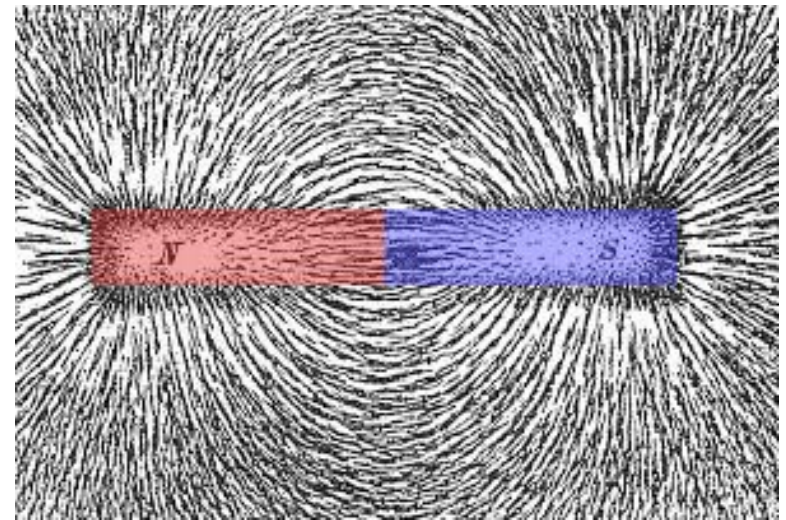
Στατικά πεδία – Όταν δεν υπάρχει χρονική μεταβολή...
... τα E- και H-πεδία **αποσυμπλέκονται**

Ηλεκτροστατικό πεδίο



Πεδιακές γραμμές ηλεκτρικού πεδίου στο διηλεκτρικό (άσπρο). Φορτία στις επιφάνειες αγωγών (γκρίζο)

Μαγνητοστατικό πεδίο



Πεδιακές γραμμές μαγνητικού πεδίου από ρινίσματα σιδήρου, παρουσία μόνιμου μαγνήτη.

ΗΜ κύματα (1)

Χρονομεταβλητά πεδία – Όταν υπάρχει χρονική μεταβολή, π.χ., κινούμενα ηλεκτρικά φορτία, τότε τα E- και H- δεν αποσυμπλέκονται, δηλαδή συνυπάρχουν.

- ▶ Από τις εξισώσεις «στροφής» του Maxwell, σε χώρο εκτός πηγών...
...προκύπτει η **εξίσωση κύματος (Helmholtz)**

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{E}) = -\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}$$

- ▶ **Παρατηρήσεις**

- Οι ΗΜ ιδιότητες (μ_r, ϵ_r) είναι συναρτήσεις του 3Δ χώρου
 - Το E-πεδίο είναι συνάρτηση και του 3Δ χώρου **και του χρόνου** 😞
- ▶ Αν θεωρήσουμε ένα **αρμονικό σήμα**, $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \cos(\omega t)$, τότε...
... η εξίσωση κύματος μετασχηματίζεται στο **πεδίο της συχνότητας**

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{E}) = \mu_0 \epsilon_0 \omega^2 \epsilon_r \mathbf{E} = k_0^2 \epsilon_r \mathbf{E}$$

$$k_0 = \frac{\omega}{c_0} \\ c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

ΗΜ κύματα (2)

Οι λύσεις τις κυματικής εξίσωσης δίνουν τη φυσική (μαθηματική) περιγραφή των ΗΜ κυμάτων...

- ▶ Σε άπειρο ομογενή χώρο (π.χ., στο κενό ή στον αέρα)

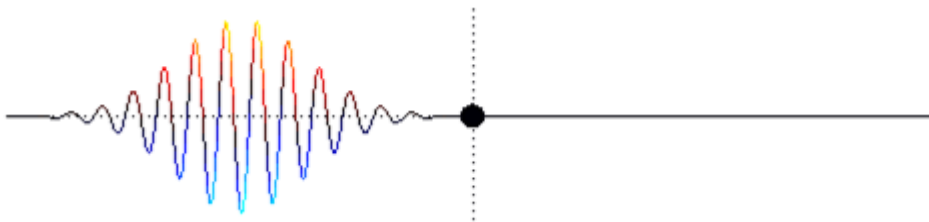
Ακτινοβολούμενα κύματα

(επίπεδα, ομοιόμορφα και εγκάρσια ΗΜ πεδία → σαν «ακτίνες»)

- ▶ Σε περιορισμένη γεωμετρία (π.χ., στο εσωτερικό ενός ομοαξονικού καλωδίου ή μίας οπτικής ίνας)

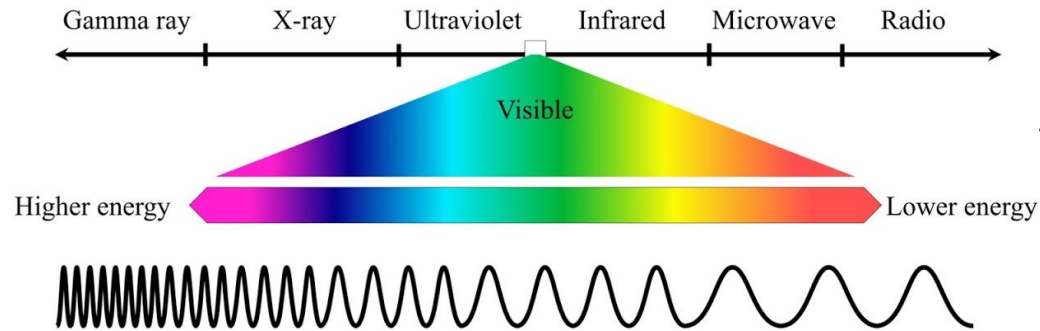
Οδηγούμενα κύματα

(πιο σύνθετα, μπορούν να περιγραφούν με γενίκευση ηλεκτρικών κυκλωμάτων)



ΗΜ κύμα είναι μία διαταραχή των ΗΜ πεδίων που διαδίδεται στον χώρο, με την πάροδο του χρόνου

ΗΜ κύματα (3)



Ιδιότητες ΗΜ κυμάτων

► Συχνότητα ω ...

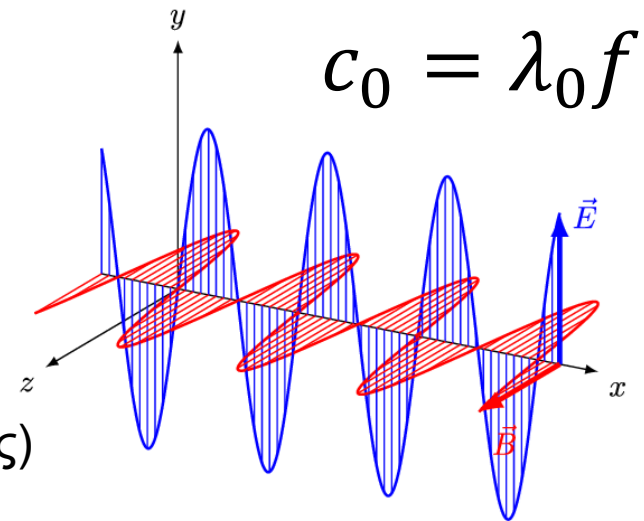
- 50 Hz (π.χ. δίκτυο ισχύος)
- 40 kHz (π.χ. Audio σήμα)
- 100 MHz (π.χ. FM radio)
- 1-5 GHz (π.χ. Mobile cellular)
- 10 GHz (π.χ. Satellite)
- 200 THz (π.χ. Optical fibers)
- 400-800 THz (π.χ. ορατό φως)

► Κατεύθυνση

- Δεν ενδιαφέρει για οδηγούμενα κύματα (πάνε μόνο μπρος/πίσω στο «καλώδιο» τους)

► Πόλωση!

- Θυμάστε πως το ΗΜ πεδίο είναι διανυσματικό ☺



Πως μοντελοποιεί ο ηλεκτρολόγος μηχανικός τα ΗΜ κύματα?

- Μέθοδοι **πλήρους κύματος** (διανυσματικά E&H, 3Δ χώρος)
- **Απλουστεύεις** (E&H-πεδία \rightarrow βαθμωτά, χώρος \rightarrow 2Δ, 1Δ ή 0Δ)

Τηλεπικοινωνίες... με ΗΜ κύματα

Γιατί? Επειδή... (1) Διαδίδονται και στο κενό, (2) δεν έχουμε κινούμενα μέρη, (3) ελέγχονται με ασφαλή επίπεδα ηλεκτρικών τάσεων

Τελικά... Μία βολική και φτηνή λύση!

▶ **Πληροφορία:** Ηλεκτρικά σήματα (μεγάλου εύρους ζώνης)

- Πομπός → Κανάλι → Δέκτης

▶ **Ενσύρματες επικοινωνίες** – Οδηγούμενα κύματα

- Κυκλωματική ανάλυση αλλά με κυματικά φαινόμενα
- Ειδικά «καλώδια» για υψίσυχνα ΗΜ σήματα →

$\frac{\text{Distance} \times \text{Bitrate}}{\$ \$ \$}$

▶ **Ασύρματες επικοινωνίες** – Κεραίες & Διάδοση

- **Κεραία:** «Μετασχηματιστής» ΗΜ κύματος από ακτινοβολούμενο σε οδηγούμενο
- **Διάδοση:** Στο κενό? Απλό. Σε **σύνθετα περιβάλλοντα** (με στοχαστικές μεταβολές)? Πιο δύσκολο... Απαιτείται «μοντελοποίηση καναλιού».

Βασικό εργαλείο: Χάραξη ακτίνων (γεωμετρική οπτική)

Αλληλεπίδραση κυμάτων με ύλη

Διηλεκτρικά και αγωγιμα υλικά

ΗΜ ιδιότητες υλικών: ϵ_r , μ_r , σ

← Πρέπει να τα ξέρουμε σε όλον τον 3Δ (xyz) χώρο

▶ Διηλεκτρικά ή μονωτές ($\epsilon_r \geq 1$, $\sigma \rightarrow 0$)

- Π.χ., αέρας, γυαλί, πλαστικό
- Παρουσία ηλεκτρικού πεδίου «πολώνονται»
- Δεν υπάρχουν ηλεκτρικά φορτία (άρα ούτε ηλεκτρικό ρεύμα)

▶ Αγωγιμα υλικά ($\sigma \gg \omega\epsilon_0$)

- Π.χ., μέταλλα (χαλκός, αλουμίνιο)
- Επιτρέπουν την κίνηση φορτίου (ηλεκτρικού ρεύματος)
- Δεν επιτρέπουν την διείσδυση ΗΜ πεδίων στο εσωτερικό τους
 - Παρά μόνο σε μικρό επιφανειακό βάθος (όταν $\sigma < \infty$)

▶ Μαγνητικά υλικά ($\mu_r > 1$)

- Π.χ., «φερρίτες» (σίδηρος και κράματα)
- Μπορούν να μαγνητιστούν, δηλαδή να αλληλοεπιδράσουν με το μαγνητικό πεδίο

Λίγες μόνο («ειδικές») εφαρμογές στις τηλεπικοινωνίες. Στα υπόλοιπα $\mu_r=1$

Υλικά με «ιδιαιότερες» ιδιότητες (*)

▶ Ημιαγωγοί

- Συμπεριφέρονται είτε ως διηλεκτρικά είτε ως αγωγοί
- Η συμπεριφορά μπορεί να «ελεγχθεί» ηλεκτρικά

▶ Ανισοτροπικά

- ΗΜ ιδιότητες που εξαρτώνται από κατεύθυνση & πόλωση

▶ Μη-γραμμικά

- Αλληλεπίδραση μεταξύ κυμάτων σε διαφορετικές συχνότητες
 - «ηλεκτρο-οπτικά» (DC \rightarrow AC)
 - Αυτό-εστίαση (ΗΜ ιδιότητες εξαρτώνται από ισχύ)
 - Φωτοαγώγιμα

▶ Πιεζοηλεκτρικά

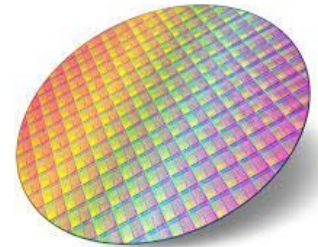
- Μηχανική τάση \leftrightarrow Ηλεκτρική τάση

▶ Θερμοηλεκτρικά

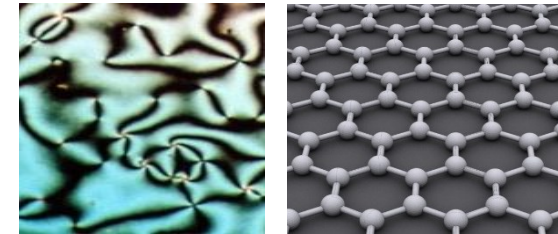
- Θερμότητα επηρεάζει τις ΗΜ ιδιότητες

□ **Δισδιάστατα** (μηδενικού-πάχους) υλικά

□ **Υλικά με διασπορά:** Εξάρτηση ΗΜ ιδιοτήτων από συχνότητα



Κάποια υλικά μπορεί να εμφανίζουν συνδυασμό ιδιαίτερων ιδιοτήτων!
(π.χ. υγροί κρύσταλλοι ή γραφένιο)

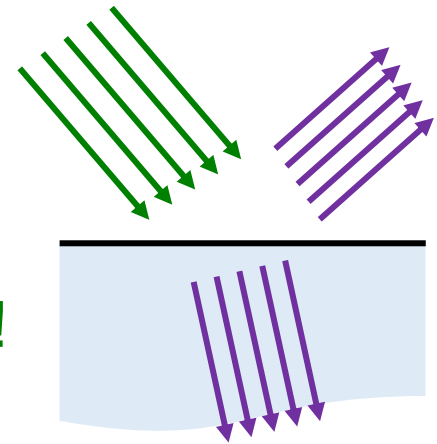


Ομοιογενείς & ετερογενείς διατάξεις

«Ελεύθερος» χώρος

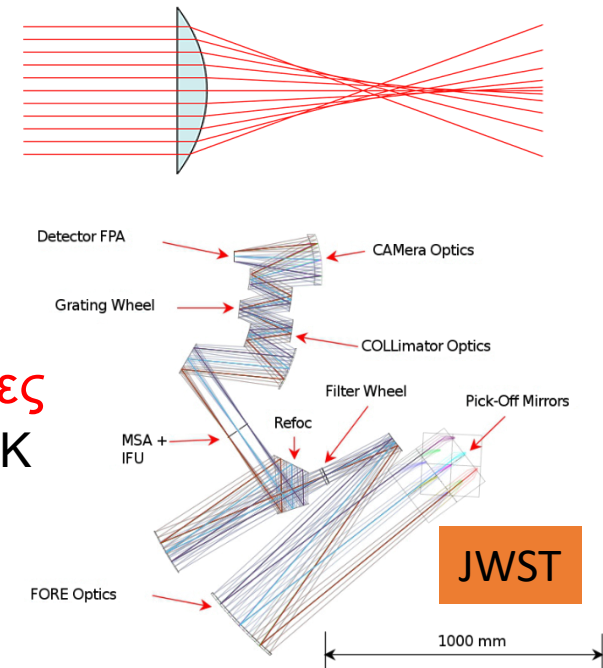
- ▶ Ομογενής διηλεκτρικός χώρος
 - Π.χ., το κενό ή (κατά προσέγγιση) ο αέρας, ή το νερό
- ▶ Απλούστερη δυνατή μορφή ΗΜ κύματος και...

Ευθύγραμμη διάδοση – Ακτίνες!



Ετερογενείς ή ανομοιογενείς διατάξεις

- ▶ Απλή επίπεδη διεπιφάνεια δύο υλικών
 - **Ανάκλαση** (για διηλεκτρικό/μέταλλο)
 - **Διάθλαση** (για διαφορετικά διηλεκτρικά)
- ▶ Διεπιφάνειες καμπύλου σχήματος
 - Π.χ., φακοί γυαλιών, «πιάτο» δορυφορικής
- ▶ Πολλά διαφορετικά υλικά σε **σύνθετες γεωμετρίες**
 - Π.χ. οπτική ίνα, κεραία κινητού, επίπεδη οθόνη ΥΚ
 - Τηλεπικοινωνιακός εξοπλισμός υποδομής:
 - Φίλτρα, διαμορφωτές, πολυπλέκτες, δρομολογητές, πηγές, δέκτες, ενισχυτές.



Μέτα-υλικά και μέτα-επιφάνειες

Σύνθετα (composite) υλικά

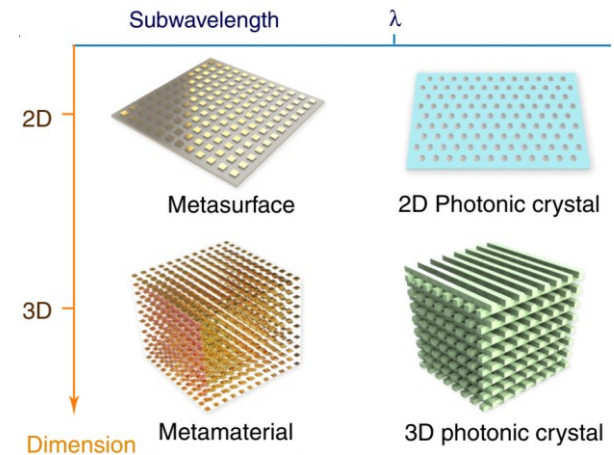
Διατάξεις δύο ή περισσότερων υλικών με **μικροδομή** διαστάσεων συγκρίσιμων ή μικρότερων του μήκους κύματος ακτινοβολίας.

- ▶ Μακροσκοπικά, για το ΗΜ κύμα, τα σύνθετα υλικά «συμπεριφέρονται» σαν ομογενή υλικά.
- ▶ Οι «ισοδύναμες» ΗΜ ιδιότητες μπορεί να πάρουν «αφύσικες» τιμές, π.χ., αρνητικό $\epsilon_{r,eff}$ ή/και $\mu_{r,eff}$

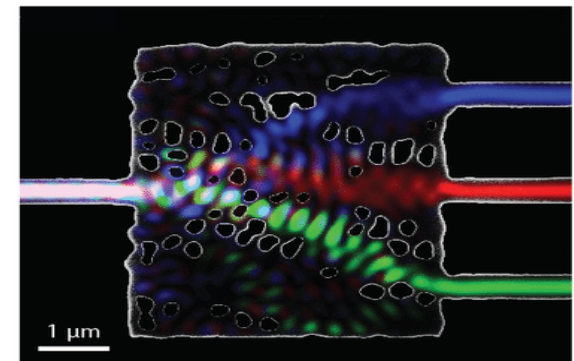
Όταν η μικροδομή είναι περιοδική...

- ... με περίοδο $\geq \lambda$ → **Φωτονικοί κρύσταλλοι**
 - ... με περίοδο $< \frac{\lambda}{2}$ → **Μέτα-υλικά**
- ▶ Η περιοδικότητα μπορεί να είναι σε...
1Δ, 2Δ ή 3Δ

Όταν η μικροδομή είναι απεριοδική...
...τυχαίο μέσο.



<https://doi.org/10.1038/s41377-021-00655-x>

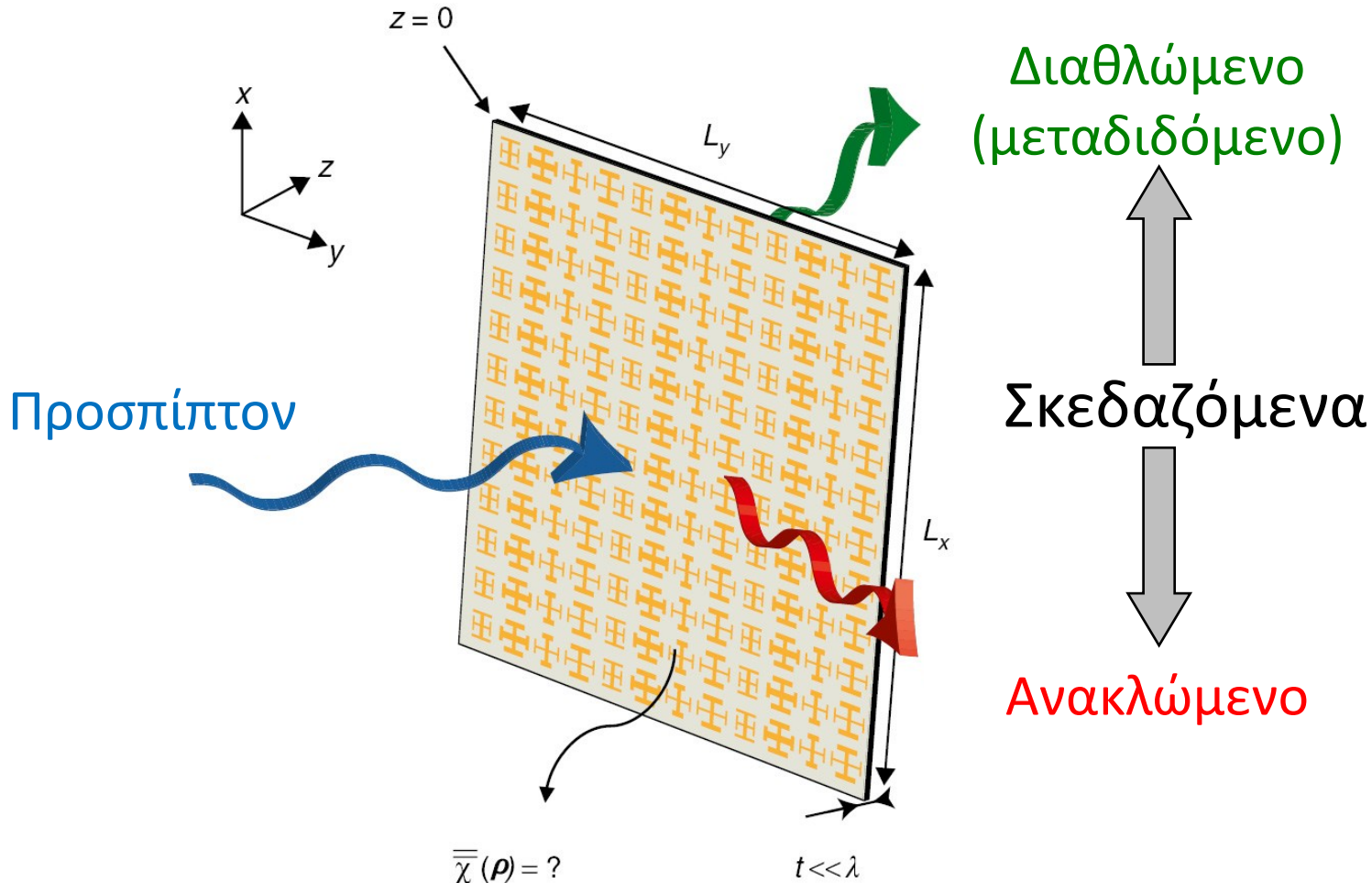


<http://dx.doi.org/10.1038/s41566-018-0246-9>

Μεταεπιφάνειες (ΜΕ)

Σύνθετα υλικά μικροδομής με **περιοδικότητα** σε 2Δ (xy -επίπεδο)

► Κατά την τρίτη διάσταση έχουν **σχεδόν μηδενικό πάχος** ($t_z \ll \lambda$).

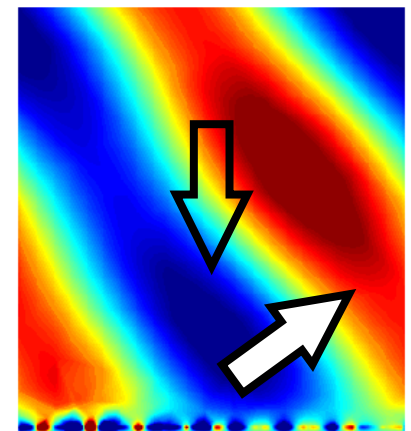
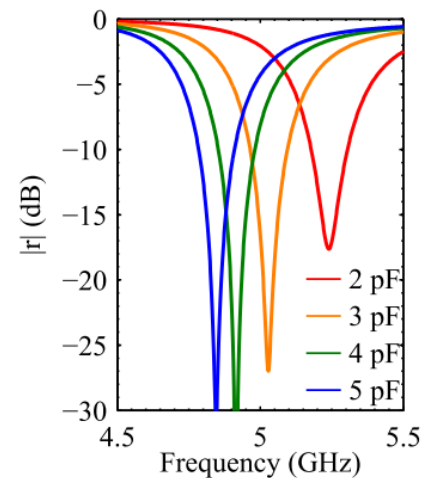
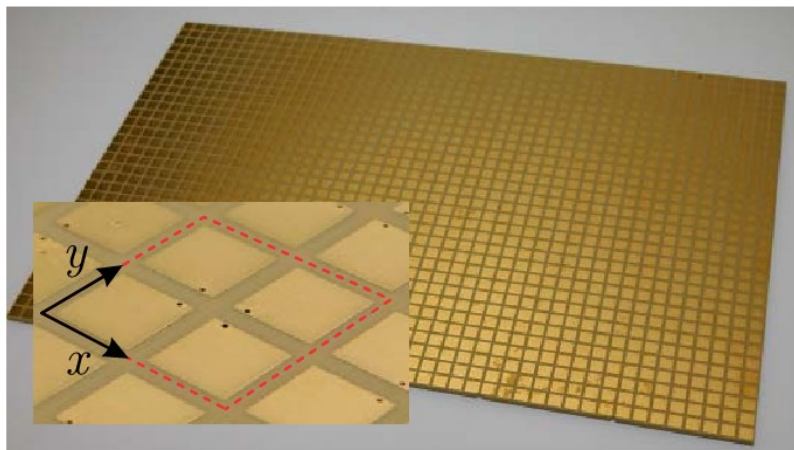
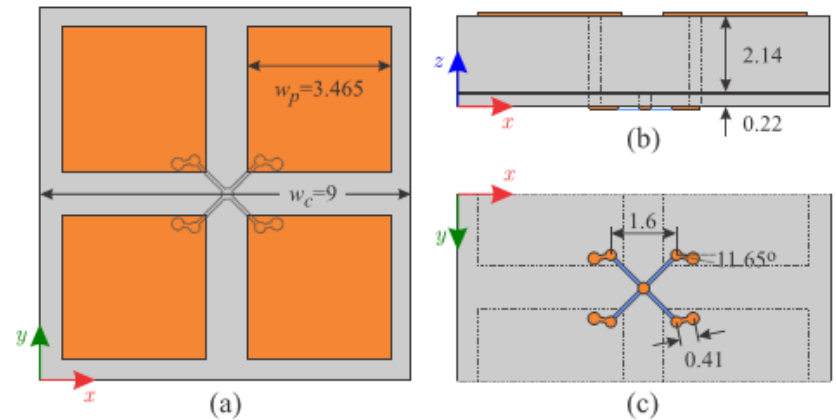
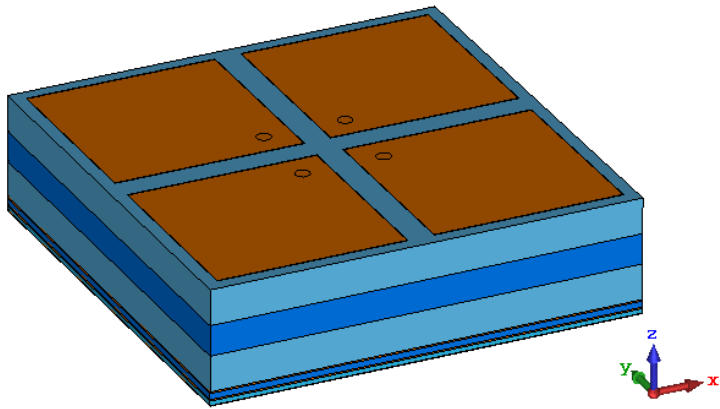


<https://doi.org/10.1515/nanoph-2017-0119>

Μοναδιαίο κελί (κυψέλη)

Η μελέτη μίας ΜΕ ανάγεται στη μελέτη των ιδιοτήτων της θεμελιώδους μονάδας της: **μοναδιαίο κελί** (unit cell) ή **μέτα-άτομο** (meta atom).

❖ Μελέτη = Ανάλυση & Σχεδίαση (βλέπε παρακάτω)



<https://doi.org/10.1109/TAP.2020.3016479>

Διασπορά και Συντονισμός

Διασπορά

Εξάρτηση της απόκρισης της διάταξης από κάποια παράμετρο του κύματος διέγερσης, π.χ., από τη συχνότητα, την πόλωση ή την γωνία πρόσπτωσης.

- ▶ Τα συμβατικά υλικά έχουν μικρή ή αμελητέα διασπορά.
- ▶ Τα μέτα-υλικά έχουν συνήθως **έντονη διασπορά**, ειδικά κοντά στον συντονισμό τους.



Συντονισμός

Έντονη μεταβολή της απόκρισης μιας διάταξης για συγκεκριμένο συνδυασμό παραμέτρων διέγερσης.

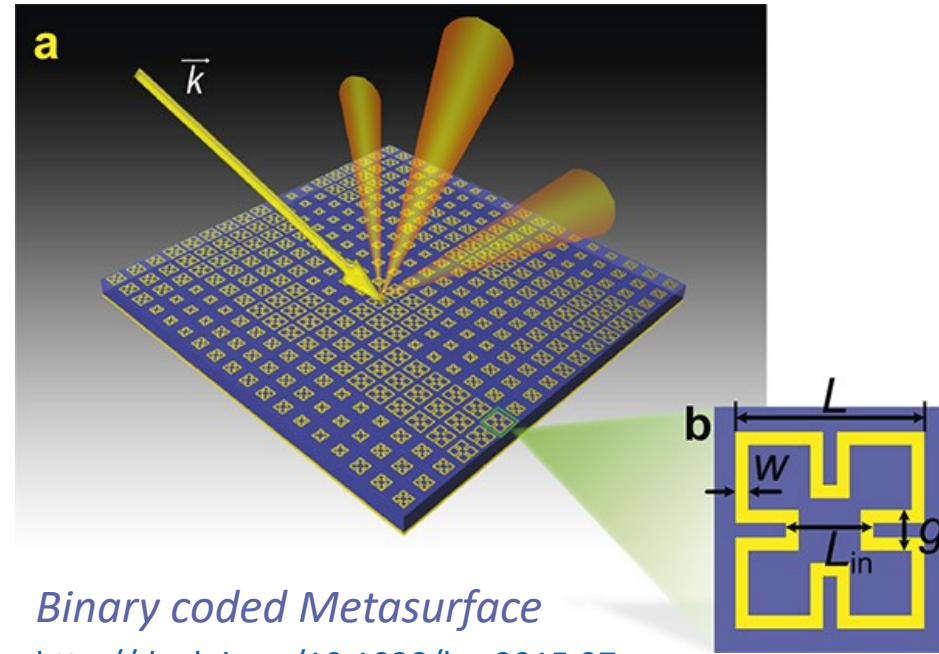
- ▶ Π.χ., μια μεταεπιφάνεια που είναι γενικά «απλά» ανακλαστική μπορεί σε κάποια/ες συχνότητα/ες **να εμφανίζει συντονισμό απορρόφησης**, δηλαδή από απλά ανακλαστική να γίνεται απορροφητική.



Ψηφιακά κωδικοποιημένες ΜΕ

Υιοθετώντας μία τοπολογία κελιού, και σχεδιάζοντας ένα **διακριτό σετ παραλλαγών του κελιού** (π.χ. κλιμακώνοντας το σχήμα στην επιφάνειά του), δηλαδή μία «οικογένεια» κελιών...

...φτιάχνουμε ένα **διακριτό σετ αποκρίσεων** (π.χ. οκτώ κελιά που καλύπτουν όλο το εύρος 360° στη φάση ανάκλασης, με «βήμα» των 45 μοιρών)



Binary coded Metasurface
<http://dx.doi.org/10.1038/lssa.2015.97>

Shape and Phase	0	-45	-90	-135	-180	-225	-270	-315
Multi-bit								
1-bit	0				1			
2-bit	00		01		10		11	
3-bit	000	001	010	011	100	101	110	111

Σετ 8 κελιών
 το καθένα δίνει
 διαφορετική $\Delta\phi$

Ανάλυση & Σχεδίαση

Ανάλυση & Σχεδίαση

Ανάλυση

- ▶ **Δίνονται** όλα χαρακτηριστικά μίας διάταξης (γεωμετρικές διαστάσεις, υλικά και ΗΜ ιδιότητες τους)
- ▶ **Ζητείται** ο υπολογισμός της απόκρισης ή της επίδοσης ως προς συγκεκριμένες μετρικές.
- ✓ Συνήθως (συγκριτικά) **ευκολότερη διαδικασία**

Σχεδίαση

- ▶ **Δίνεται** η επιθυμητή απόκριση ή επίδοση
- ▶ **Ζητείται** ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών της διάταξης (γεωμετρικές διαστάσεις ή επιλογή υλικών) που την επιτυγχάνει.
- × Πιο σύνθετη διαδικασία, συχνά απαιτεί **βελτιστοποίηση**

- Για ευκολία στη σχεδίασης, συνήθως αφήνονται μόνο λίγες παράμετροι του προβλήματος «ελεύθερες» προς βελτιστοποίηση, ενώ οι υπόλοιπες παίρνουν τυπικές τιμές.

Εργαλεία ΗΜ ανάλυσης & σχεδίασης

Θεωρία και Προσομοίωση

- ▶ **Θεωρία:** Δουλεύουμε «στο χαρτί» με την φυσική του ΗΜ προβλήματος και προσπαθούμε, με κατάλληλες απλοποιήσεις και παραδοχές, να φτάσουμε σε κλειστές σχέσεις (μοντέλα) που περιγράφουν την λειτουργία, π.χ.,

$$\begin{aligned} \text{επίδοση} &= \text{function}\{ \text{παραμέτρων} \} \\ \text{παράμετροι} &= \text{function}^{-1}\{ \text{επίδοσης} \} \end{aligned}$$

- ▶ **Προσομοίωση:** Δίνουμε στον υπολογιστή τη μαθηματική έκφραση του ΗΜ προβλήματος (ενδεχομένως με απλοποιήσεις). Επίσης, του δίνουμε τη διάταξη που θέλουμε να μελετήσουμε, π.χ. με CAD. Ο υπολογιστής κάνει τη βαριά δουλειά. Εμείς περιμένουμε! 😊

Υπολογιστικός ΗΜ (computational electromagnetics)

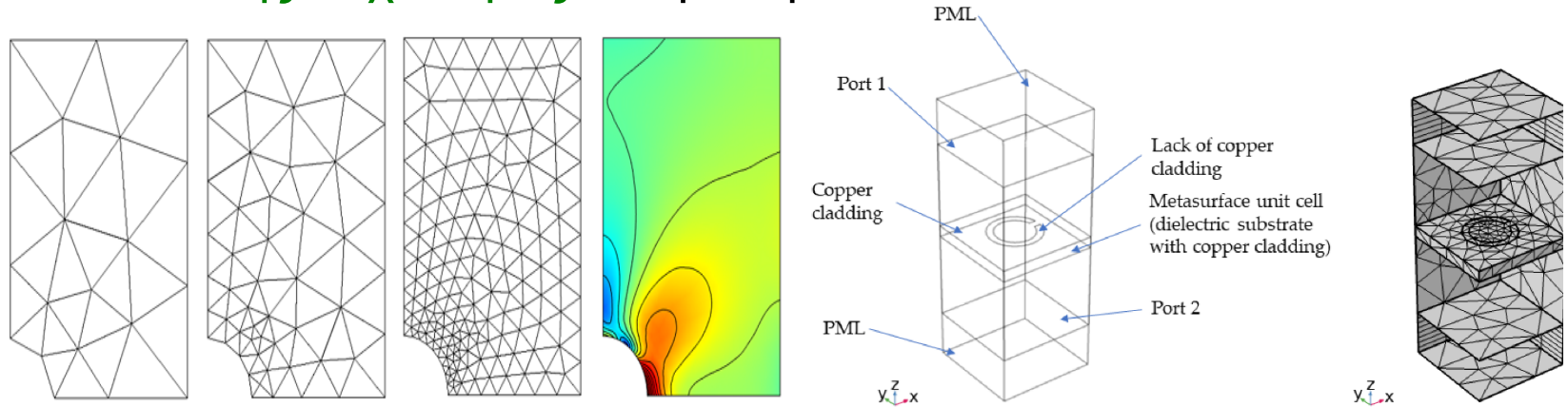
Η χρήση Η/Υ για επίλυση ΗΜ προβλημάτων.

- ▶ **Γενικές μέθοδοι** (FEM-FD, FDM-TD) που μπορούν να προσομοιώσουν, να λύσουν, αυθαίρετα προβλήματα
- ▶ **Ειδικές μέθοδοι** προσαρμοσμένες σε συγκεκριμένα προβλήματα
- ❖ Εμπορικά λογισμικά (COMSOL, CST, HFSS) ή custom κώδικες.

Μέθοδοι Υπολογιστικού ΗΜ

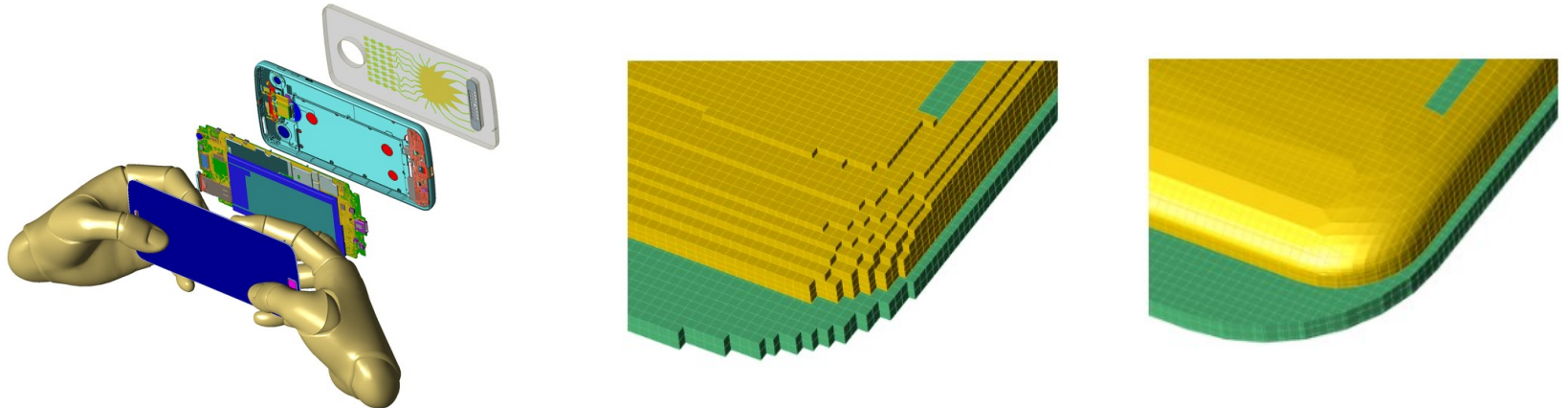
FEM: Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (finite element method)

► Στο πεδίο της συχνότητας → Άριστη ακρίβεια σε μία συχνότητα



FDM: Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (finite difference method)

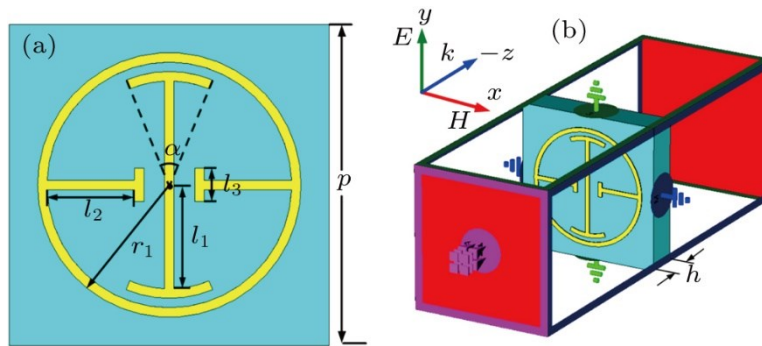
► Στο πεδίο του χρόνου (FDTD) → Υπολογισμός ευρυζωνικής απόκρισης



Μελέτη ΜΕ σε δύο κλίμακες

Μοναδιαίο κελί (μικροσκοπικά)

- ▶ Η προς μελέτη διάταξη έχει μικρές «ηλεκτρικές διαστάσεις» (π.χ. $V \ll \lambda^3$), οπότε μελετάται πλήρως-ΗΜ, συνήθως με προσομοίωση.

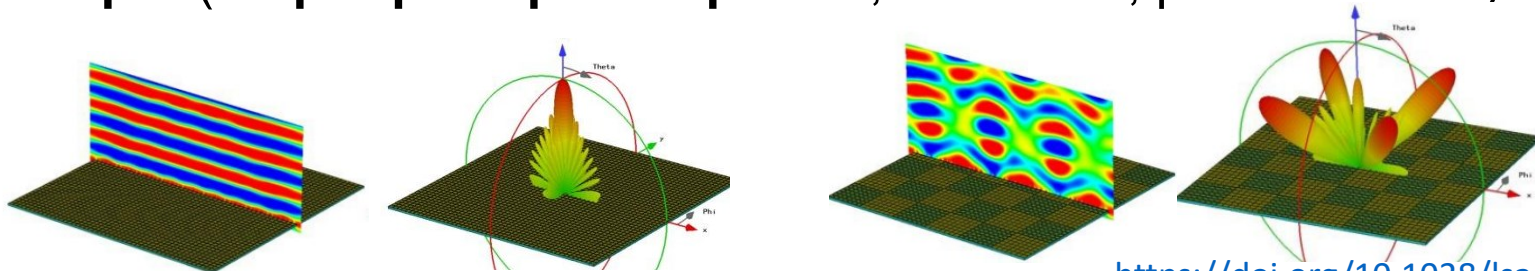


Ένα μόνο ορθογωνικό κελί. Στις τέσσερις πλευρικές έδρες έχουμε «περιοδικές» οριακές συνθήκες. Οι πάνω/κάτω έδρες (κόκκινο χρώμα) είναι οι «θύρες» εισόδου & εξόδου.

<http://dx.doi.org/10.1088/1674-1056/27/8/084101>

Μεταεπιφάνεια (μακροσκοπικά)

- ▶ Η προς μελέτη διάταξη ενδέχεται να έχει $V \gg \lambda^3$, οπότε για τη μελέτη της απαιτούνται **απλοποιήσεις (στη θεωρία)** ή **μεγάλοι πόροι (στην προσομοίωση: RAM, CPU time, parallelization)**



<https://doi.org/10.1038/lisa.2014.99>

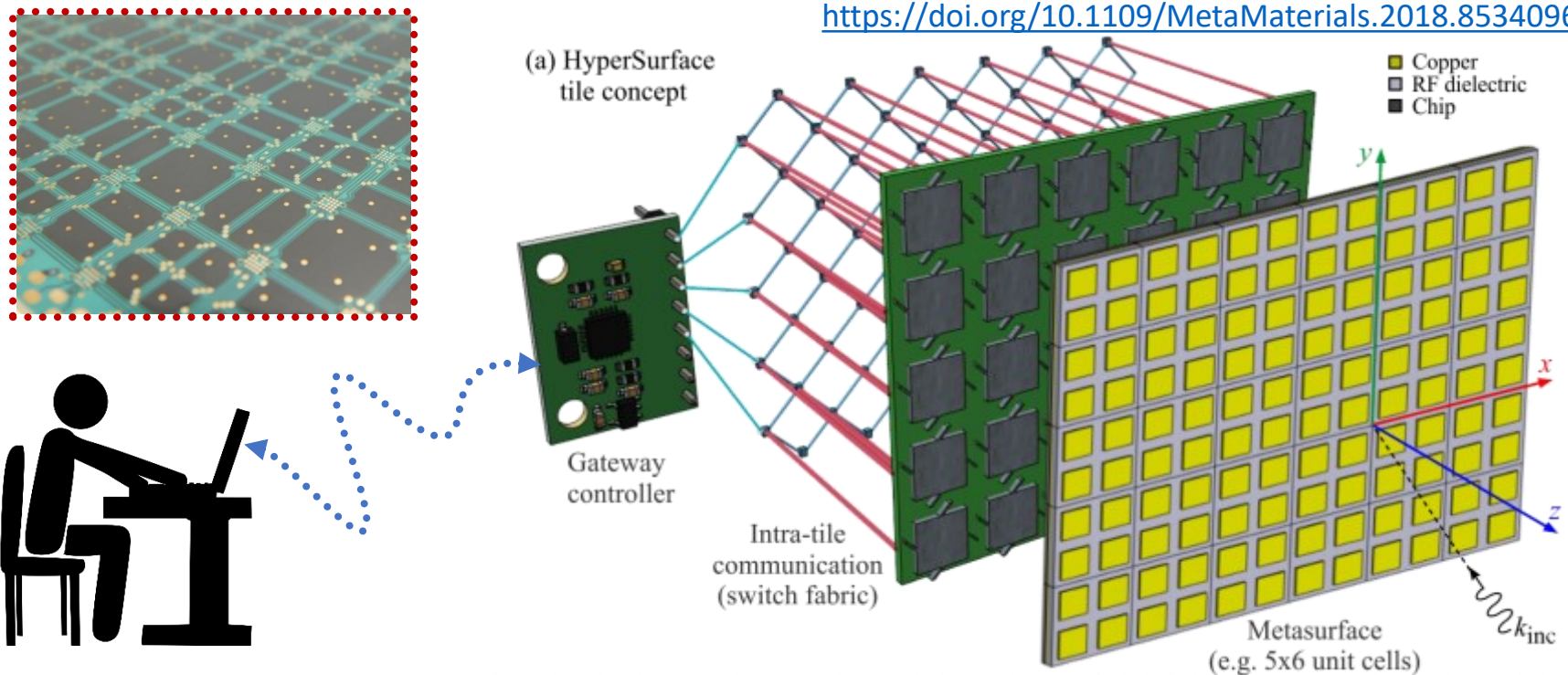
Προγραμματιζόμενες Μεταπιφάνειες

Έλεγχος/μεταβολή της απόκρισης

Πως θα μπορούσε η **απόκριση της μεταεπιφάνειας να «ελεγχθεί»** (π.χ., να αλλάξει η λειτουργία ή η συχνότητα συντονισμού)?

- ▶ Αν **σε κάθε κελί υπήρχε ένα τσιπ** που να αλλάζει τις R-L-C τιμές ενός ισοδύναμου κυκλώματος, αλλάζοντας την απόκριση.
- ▶ Αν **όλα τα τσιπ ελέγχονταν ταυτόχρονα** από έναν υπολογιστή.

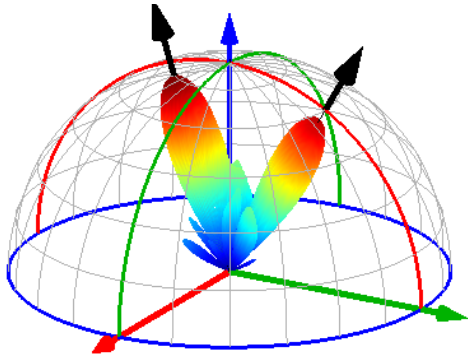
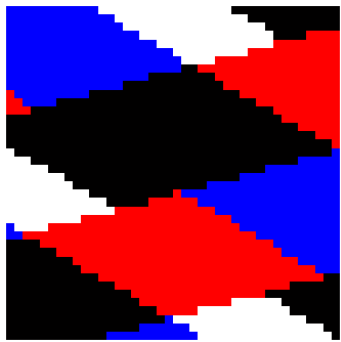
<https://doi.org/10.1109/MetaMaterials.2018.8534096>



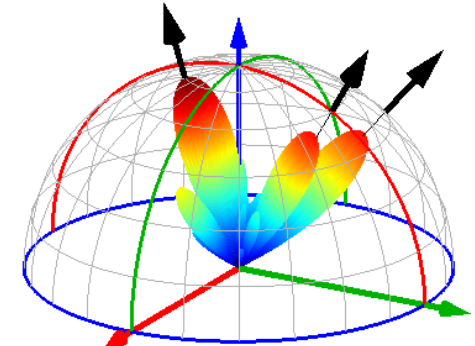
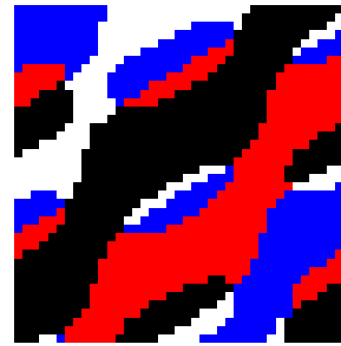
Έξυπνες πολύ-λειτουργικές μεταεπιφάνειες (ΜΕ)

Τι μπορεί να κάνει μία **ψηφιακή ΜΕ** 40x40 κελιών που το καθένα έχει 4 πιθανές καταστάσεις (2-bit)? Σχεδόν τα πάντα, ανάλογα με **κωδικοποίηση** 😊

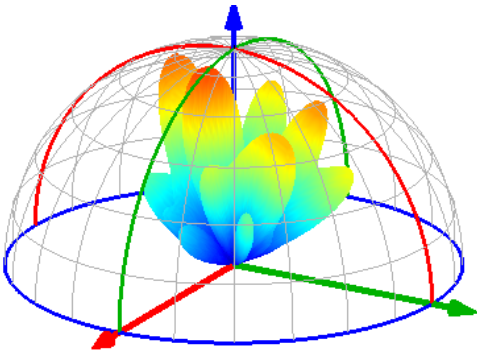
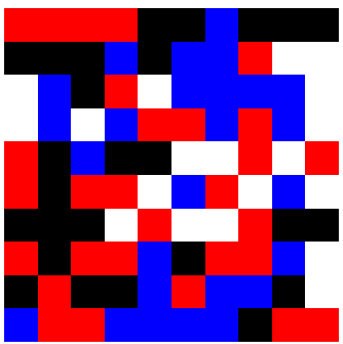
Διαχωρισμός σε 2 δέσμες



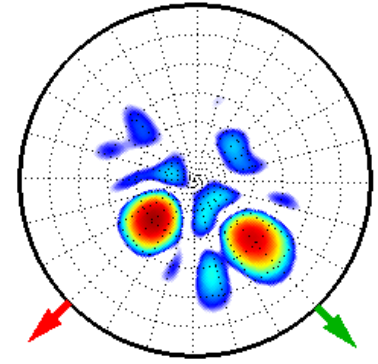
Διαχωρισμός σε 3 δέσμες



Σκέδαση προς τυχαίες κατευθύνσεις



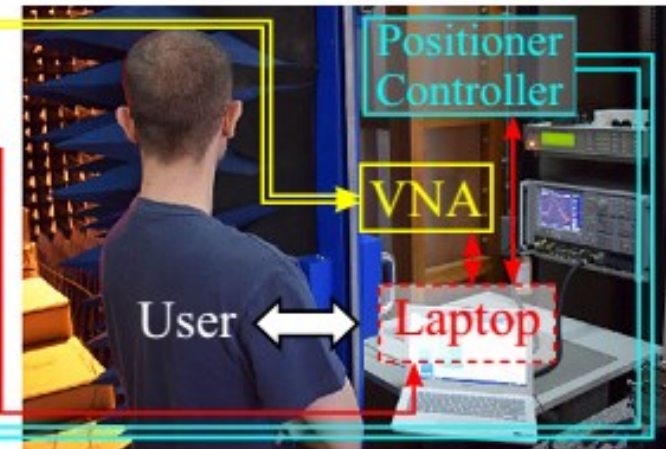
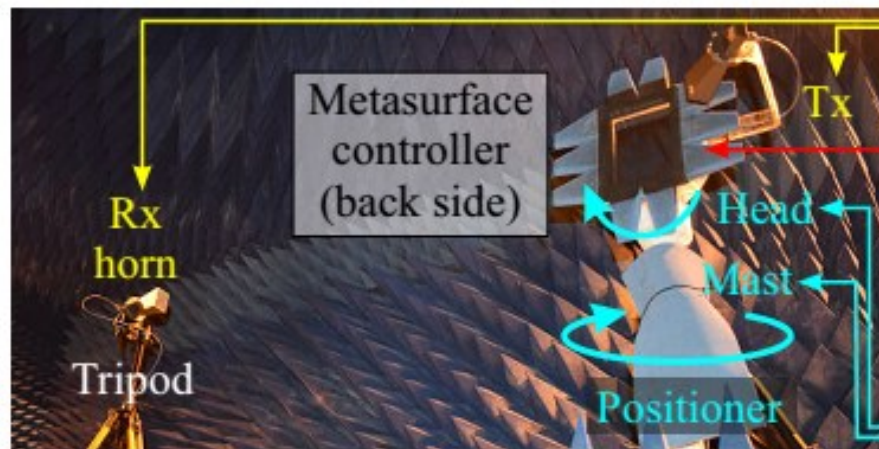
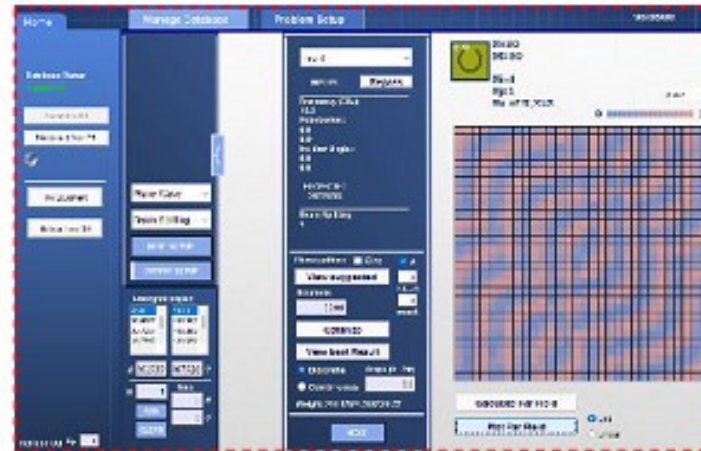
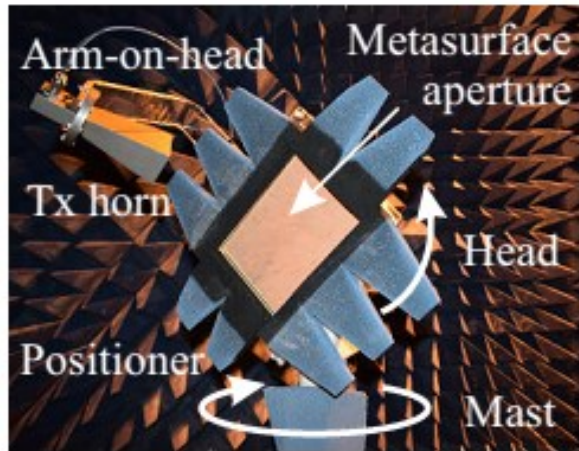
Παραλληλισμός πηγής σε 2 δέσμες



<https://doi.org/10.1109/MVT.2022.3155905>

Από τη θεωρία στην πράξη

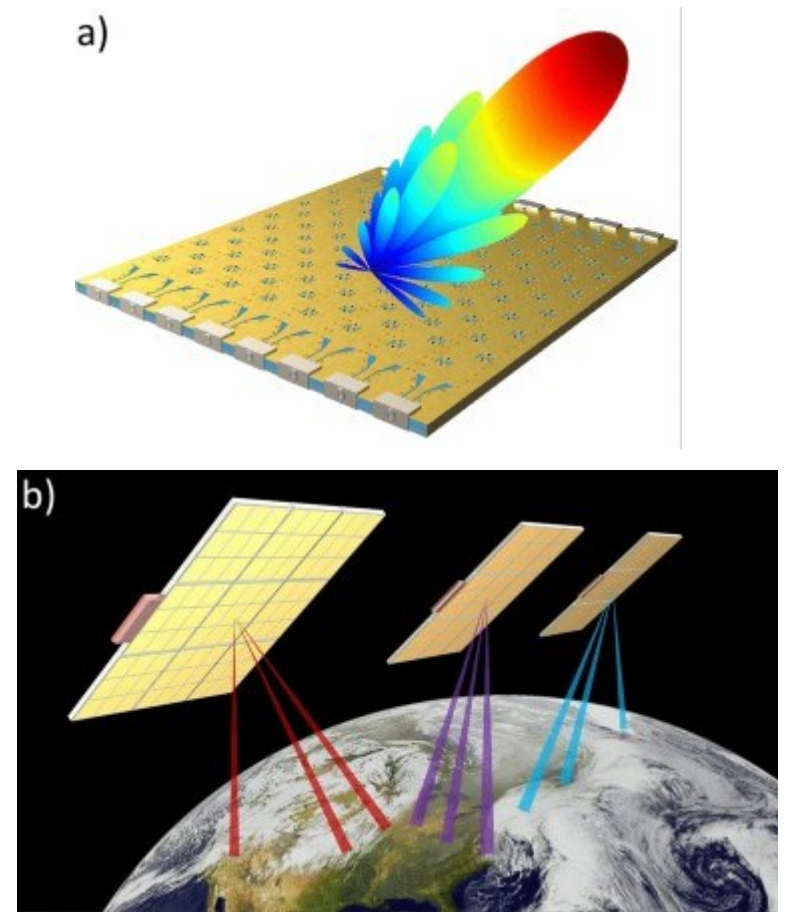
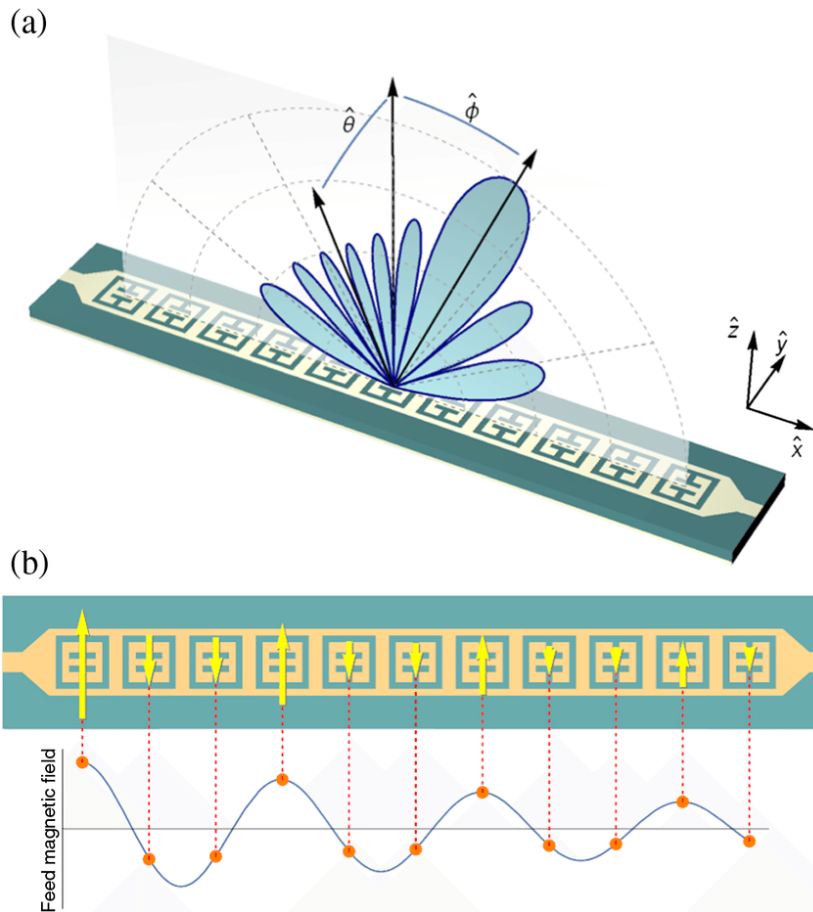
Καλή και η θεωρία (το “concept”), αλλά στην πράξη, απαιτείται ακριβής (1) ΗΜ σχεδίαση, (2) κατασκευή, και (3) **πειραματικός χαρακτηρισμός!**



<https://doi.org/10.1109/ISCC55528.2022.9912805>

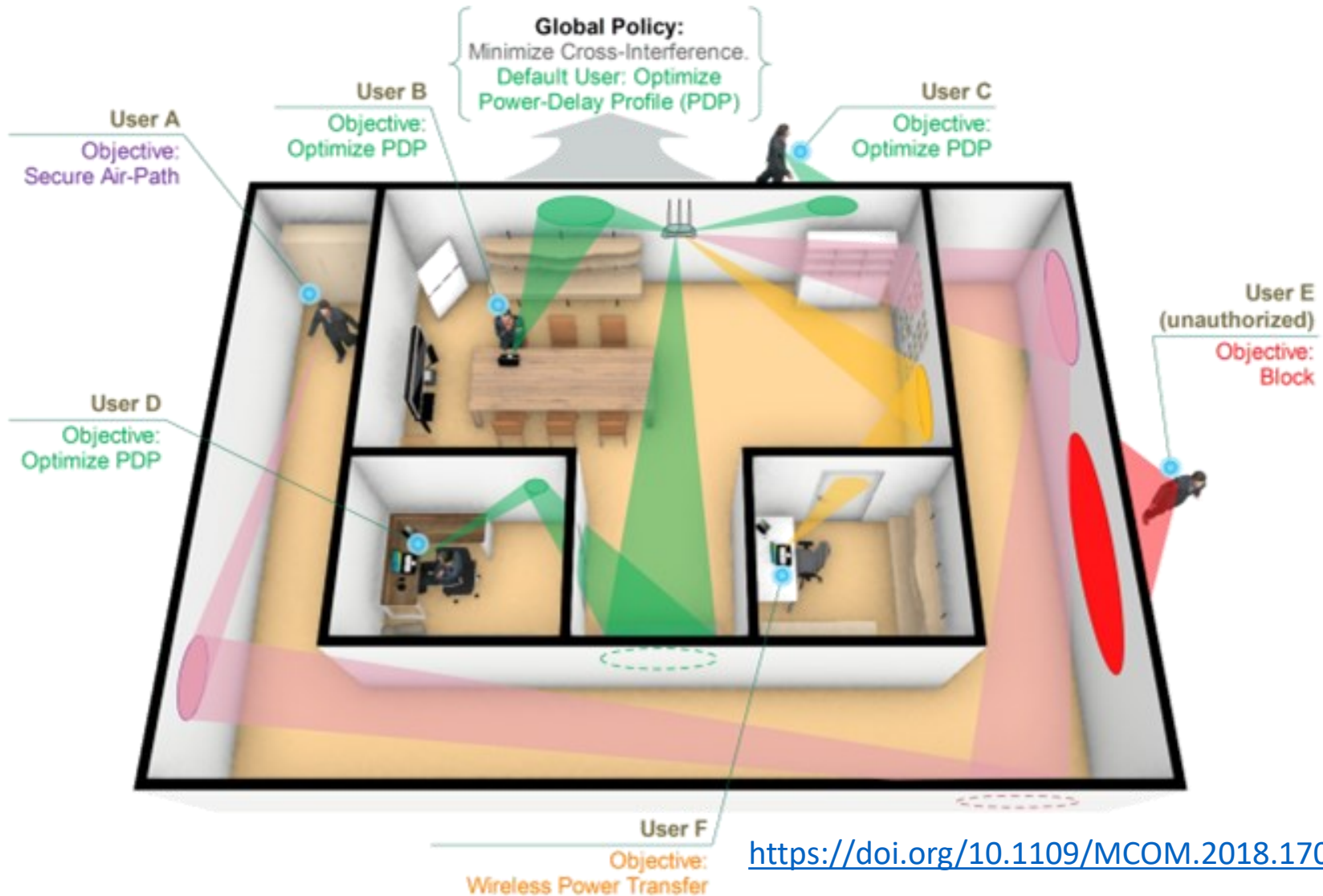
Εφαρμογές Μεταεπιφανείων Ασύρματες επικοινωνίες

... σε κεραιές



D.R. Smith group -- <http://people.ee.duke.edu/~drsmith/>

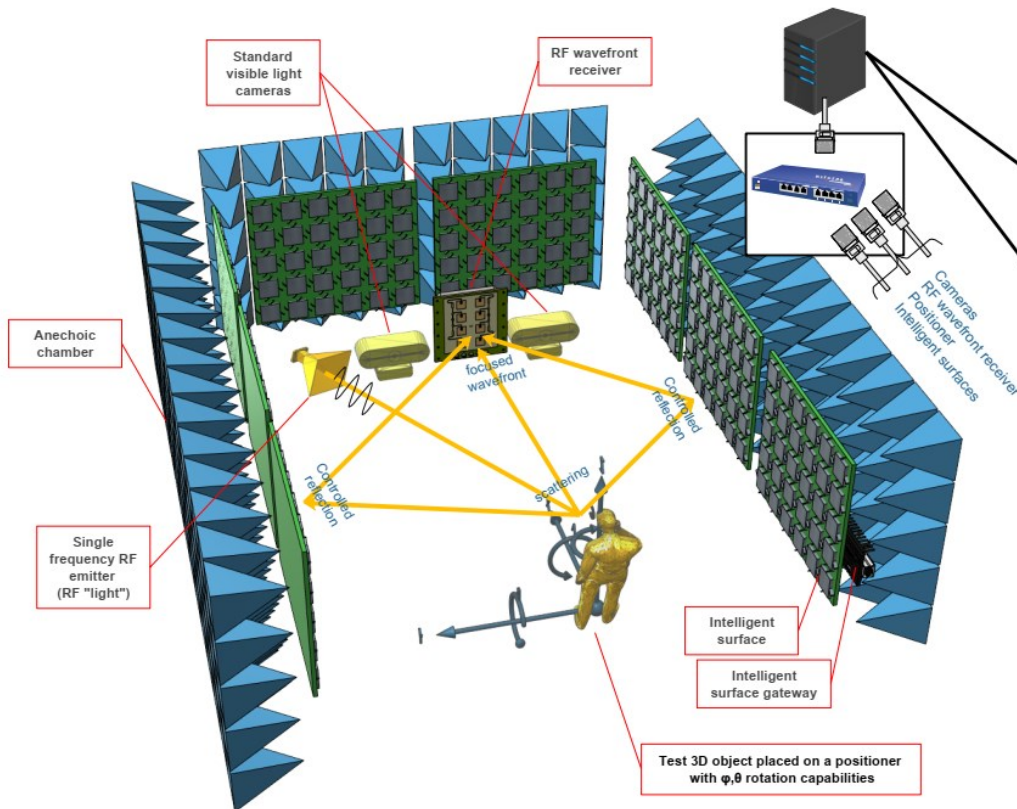
...σε εσωτερικά ασύρματα περιβάλλοντα



<https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700659>

... σε AR/VR (XR) και ολογραφία

Οι έξυπνες μεταεπιφάνειες, σε μία λειτουργία αντίστοιχη του radar, μπορούν να «εκπαιδευτούν» ώστε **να αναγνωρίζουν ένα 3Δ αντικείμενο** (σχήμα, σύσταση) και **να το ανακατασκευάζουν** σε άλλο χώρο/χρόνο (**ολογραφία**).



Initiate Tx single frequency emission
Optionally: Tune PWE to achieve wavefront focusing
REPEAT:

Rotate 3D object randomly.

Obtain <R-eye, L-eye images, RF wavefront reading>:



add <img: R-eye, img: L-eye, RF reading> to dataset

UNTIL dataset sufficiently large

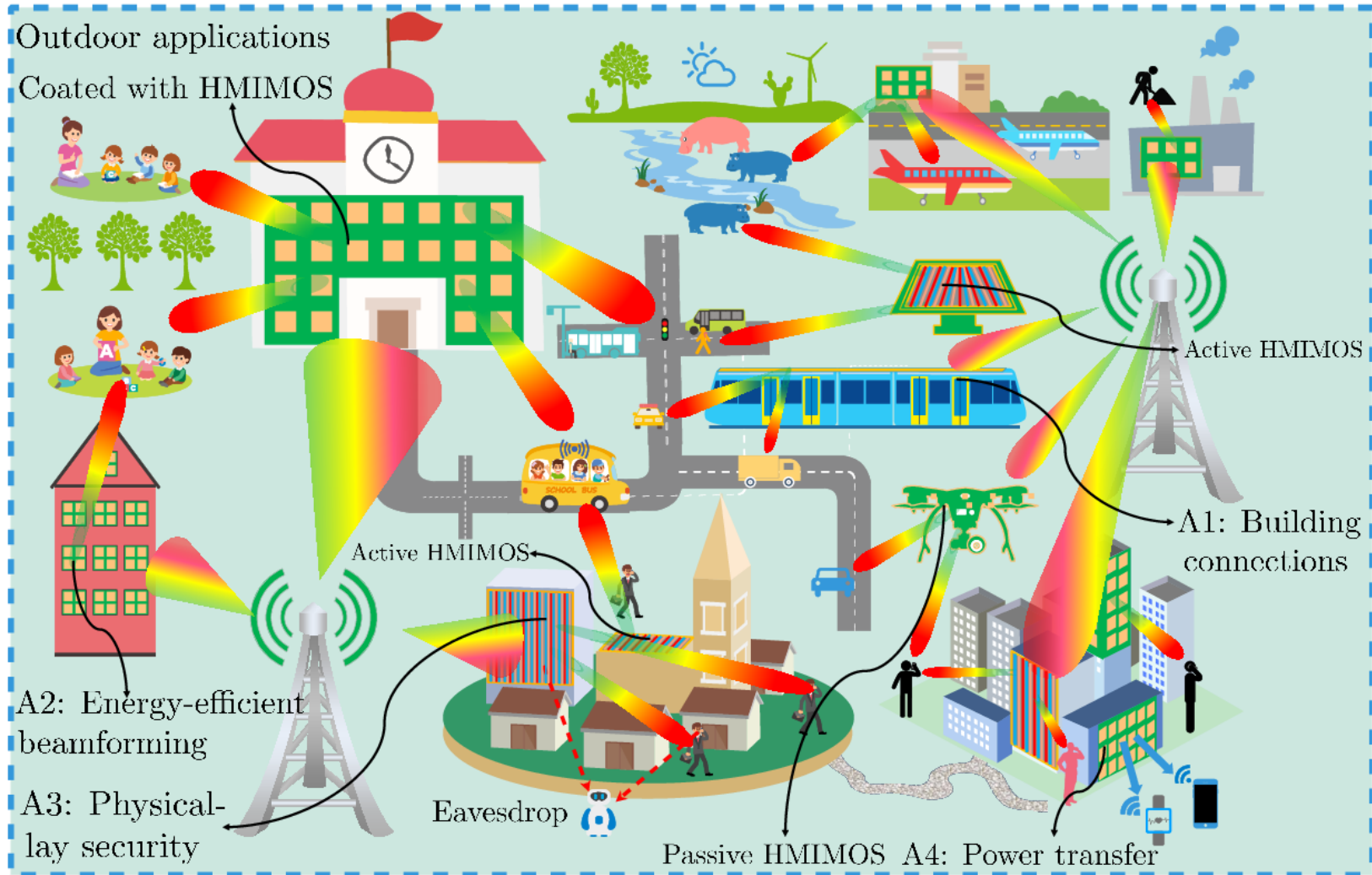
THEN

Train a GAN to match the

RF reading \rightarrow \rightarrow <R-eye, L-eye> images

<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3219871>

...σε ασύρματα δίκτυα, γενικά κ αόριστα!



<https://doi.org/10.1109/MWC.001.1900534>

Έρευνα & Ανάπτυξη

Επίλογος – Από την Έρευνα στην Ανάπτυξη

- ▶ Η περιοχή των **έξυπνων προγραμματιζόμενων μεταεπιφανείων** (reconfigurable intelligent surfaces, **RIS or IRS**) έχει ωριμάσει θεωρητικά και τεχνολογικά την τελευταία πενταετία.
 - ✓ Είναι η εποχή **μετάβασης από την έρευνα στην ανάπτυξη** όλο και πιο σύνθετων συστημάτων και εφαρμογών.
- ▶ Ειδικά οι εφαρμογές στις **ασύρματες επικοινωνίες** τρέχουσας γενιάς (5G), αλλά και των επερχόμενων (B5G και 6G), παρουσιάζουν τεράστιο πρακτικό ενδιαφέρον
 - Μικροκυματικές και των χιλιοστομετρικές (mmWave) συχνότητες
- ▶ Μεταεπιφάνειες εξαπλώνονται και σε άλλες πιο **«δύσκολες» περιοχές του ΗΜ φάσματος**:
 - **THz**: Ανεξερεύνητη περιοχή λόγω της έλλειψης αποδοτικών πηγών.
 - **Υπέρυθρο & ορατό**: Δυσκολία κατασκευής ΜΕ, λόγω των νανομετρικών διαστάσεων των κελιών που απαιτούνται

Ευχαριστίες | Συνεργάτες και χρηματοδότηση

Ίδρυμα Έρευνας και Τεχνολογίας (ΙΤΕ)

- ▶ Χρήστος Λιάσκος (Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων)
- ▶ Μαρία Καφεσάκη (Πανεπιστήμιο Κρήτης)
- Οδυσσέας Τσιλιπάκος (ΕΙΕ)
- Άννα Τασολάμπρου (ΕΚΠΑ)

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ)

- ▶ Νίκος Κανταρτζής
- Γιώργος Καραγιαννίδης

Χρηματοδότηση

- **Project VISORSURF:** European Union Horizon 2020 Research and Innovation Programme – Future Emerging Topics (FETOPEN) Grant 736876
- **Project WISAR:** Theodore Papazoglou synergy grant 2022 (Foundation for Research and Technology – Hellas, FORTH)

