



Πανεπιστήμιο
Αιγαίου

Ανοικτά
Ακαδημαϊκά
Μαθήματα



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ ΚΑΙ ΓΣΠ

Διευθυντής: καθηγητής Ι. Ν. Χατζόπουλος



Εισαγωγή στην Τηλεπισκόπηση (326Ε)

Καθηγητής Ιωάννης Ν. Χατζόπουλος

ihatz@aegean.gr

http://www.env.aegean.gr/labs/Remote_sensing/Remote_sensing.htm



Διάλεξη-09
Εικόνες Ραντάρ

Άδειες Χρήσης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, διαγράμματα, κείμενα, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Χρηματοδότηση

Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα. Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αιγαίου**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.



Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Εικόνες Ραντάρ

- **Η θεωρία περιλαμβάνει:**

- Ραντάρ απλού και συνθετικού διαφράγματος – συμβολομετρία. Βασικές αρχές του Ραντάρ.
- Μικροκυματικές φασματικές ζώνες. Ορολογία radar. Μετατόπιση λόγω αναγλύφου.
- Ραντάρ συνθετικού διαφράγματος συμβολομετρίας (IfSAR). Μέθοδοι, Συστήματα. Ταχύτητα διάδοσης v σε μέσο. Μήκος παλμού τ [μ -sec].
- Διαχωριστική ικανότητα κατά απόσταση και κατά αζιμούθιο. Πραγματικό και συνθετικό άνοιγμα κεραίας. Μετατόπιση της συχνότητας κατά Dopler.
- Ο ρόλος της περιεχόμενης υγρασίας στη διηλεκτρική σταθερά. Κριτήριο Rayleigh για λεία επιφάνεια.
- Γεωμετρική παραμόρφωση εικόνων Radar. Αναστροφή, σμίκρυνση, σκιά, στίγματα-speckles. Δορυφορικά συστήματα Radar.

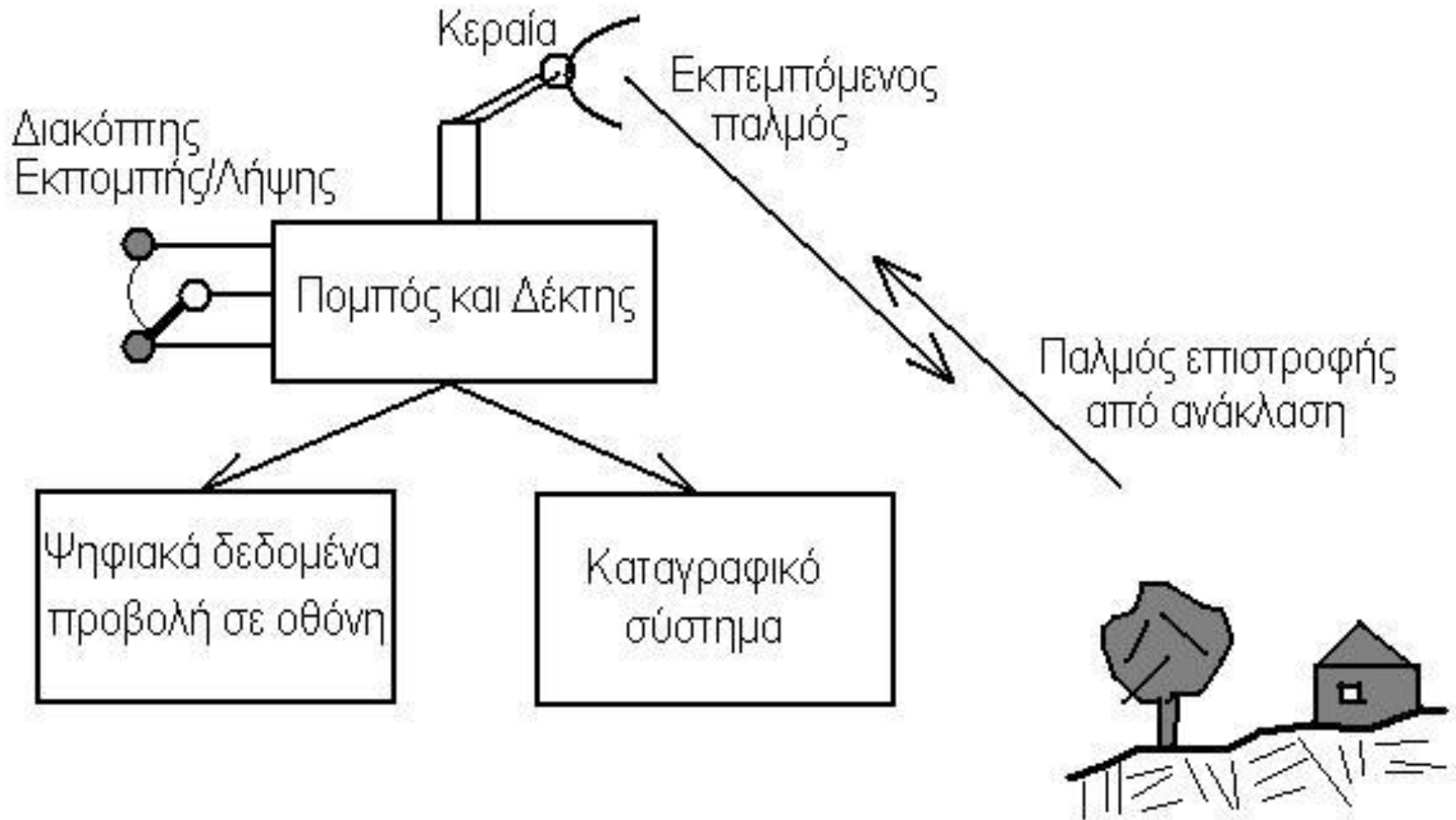
- **Το εργαστήριο περιλαμβάνει:**

- Εικόνες Ραντάρ

Ραντάρ απλού και συνθετικού διαφράγματος - συμβολομετρία

- Το ραντάρ παρόμοιο με τα συστήματα εθνικής άμυνας για την ανίχνευση αεροπλάνων και άλλων αντικειμένων.
- Το ραντάρ δίνει εικόνες μέρα ή νύκτα και σχεδόν με οποιεσδήποτε καιρικές συνθήκες.
- Οπτικά συστήματα: δεν μπορούν να λειτουργήσουν με νεφοκάλυψη.
- Ιδιαιτερότητες: Όταν βλέπει κανείς πρώτη φορά κάβουρα περιμένει να τον δει να περπατά προς τα εμπρός και ξαφνιάζεται όταν τον δει να περπατά στο πλάι, έτσι και το ραντάρ δεν μπορεί να σχηματίσει εικόνα στο ναδίρ όπως όλα τα άλλα εικονοληπτικά συστήματα αλλά σχηματίζει με μεγάλη άνεση εικόνα στο πλάι σε απόσταση μάλιστα από το ναδίρ.
- Ραντάρ προέρχεται: ***Radiation Detection and ranging***
ήτοι: ανίχνευση ακτινοβολίας και μέτρηση απόστασης.

Βασικές αρχές του Ραντάρ

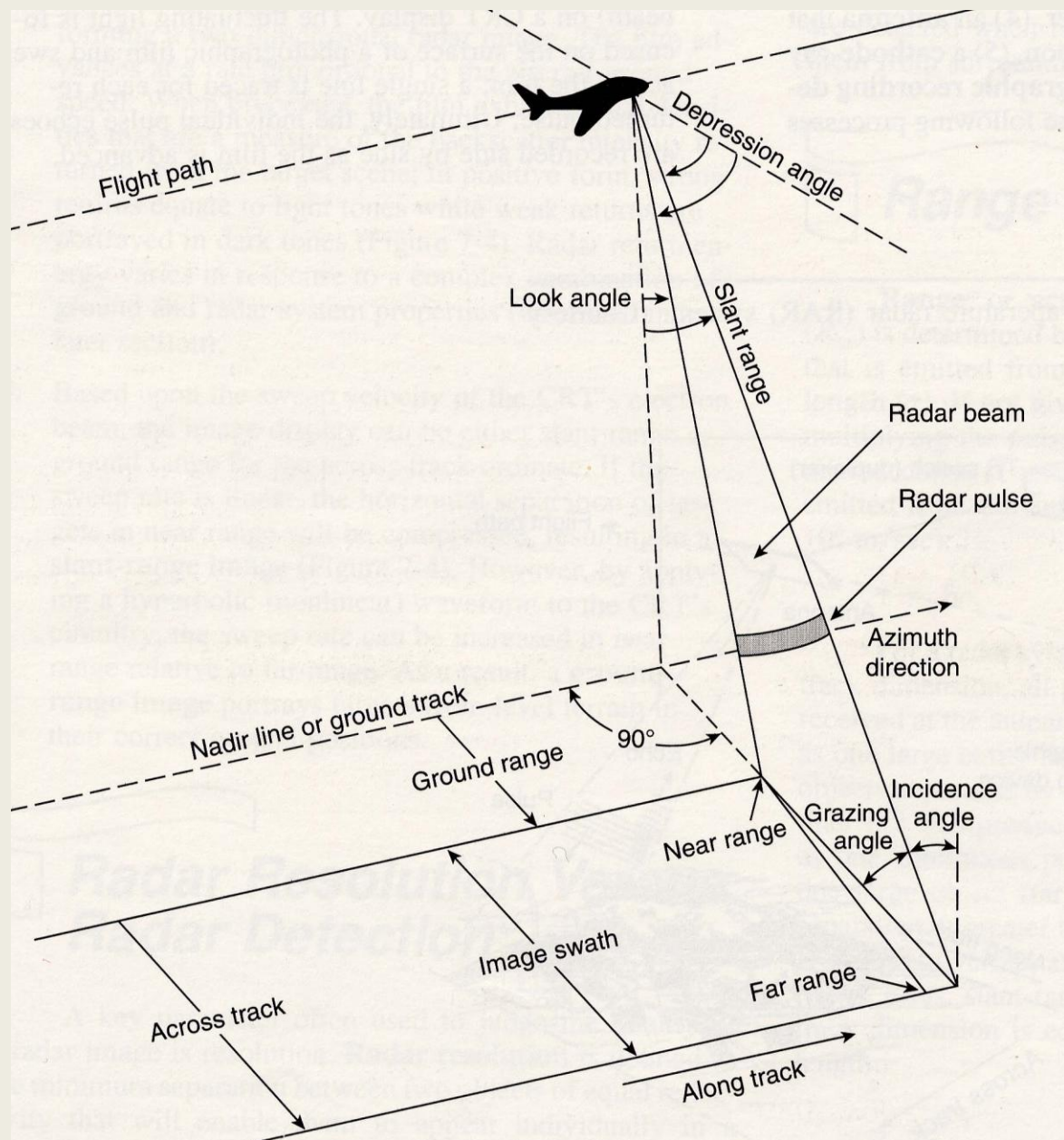


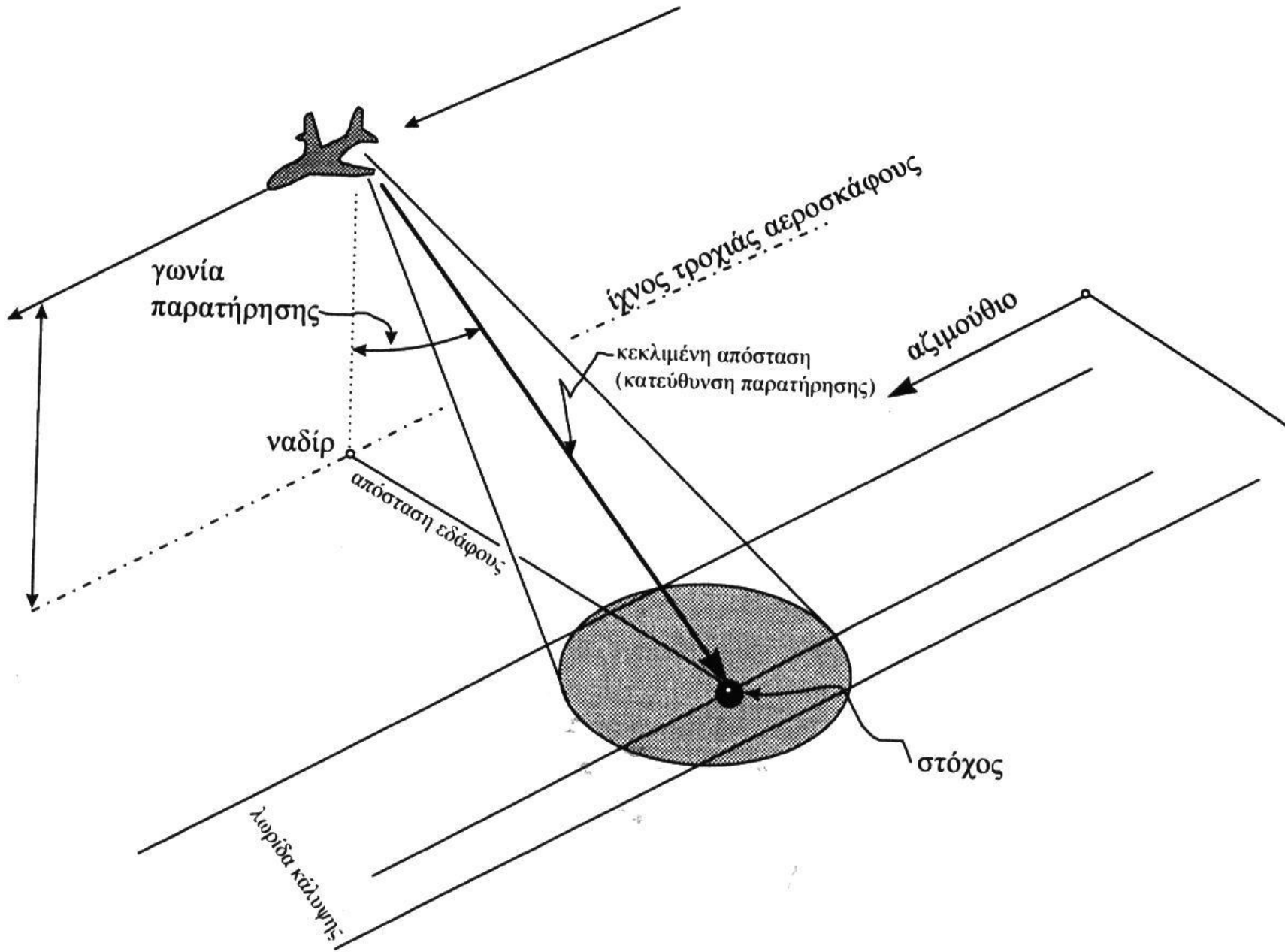
Μικροκυματικές φασματικές ζώνες

$$S_r = \frac{ct}{2}$$

Φασματική Ζώνη	Συχνότητα (GHz)	Μήκος κύματος (cm)
P	0.225 - 0.390	133 - 76.90
L	0.390 - 1.550	76.90 - 19.3
S	1.550 - 4.20	19.3 - 7.1
C	4.20 - 5.75	7.1 - 5.2
X	5.75 - 10.90	5.2 - 2.7
K	10.90 - 36.0	2.7 - 0.83
Ku	10.90 - 22.0	
Ka	22.0 - 36.0	
Q	36.0 - 46.0	0.83 - 0.65
V	46.0 - 56.0	0.65 - 0.53
W	56.0 - 100.0	0.53 - 0.30

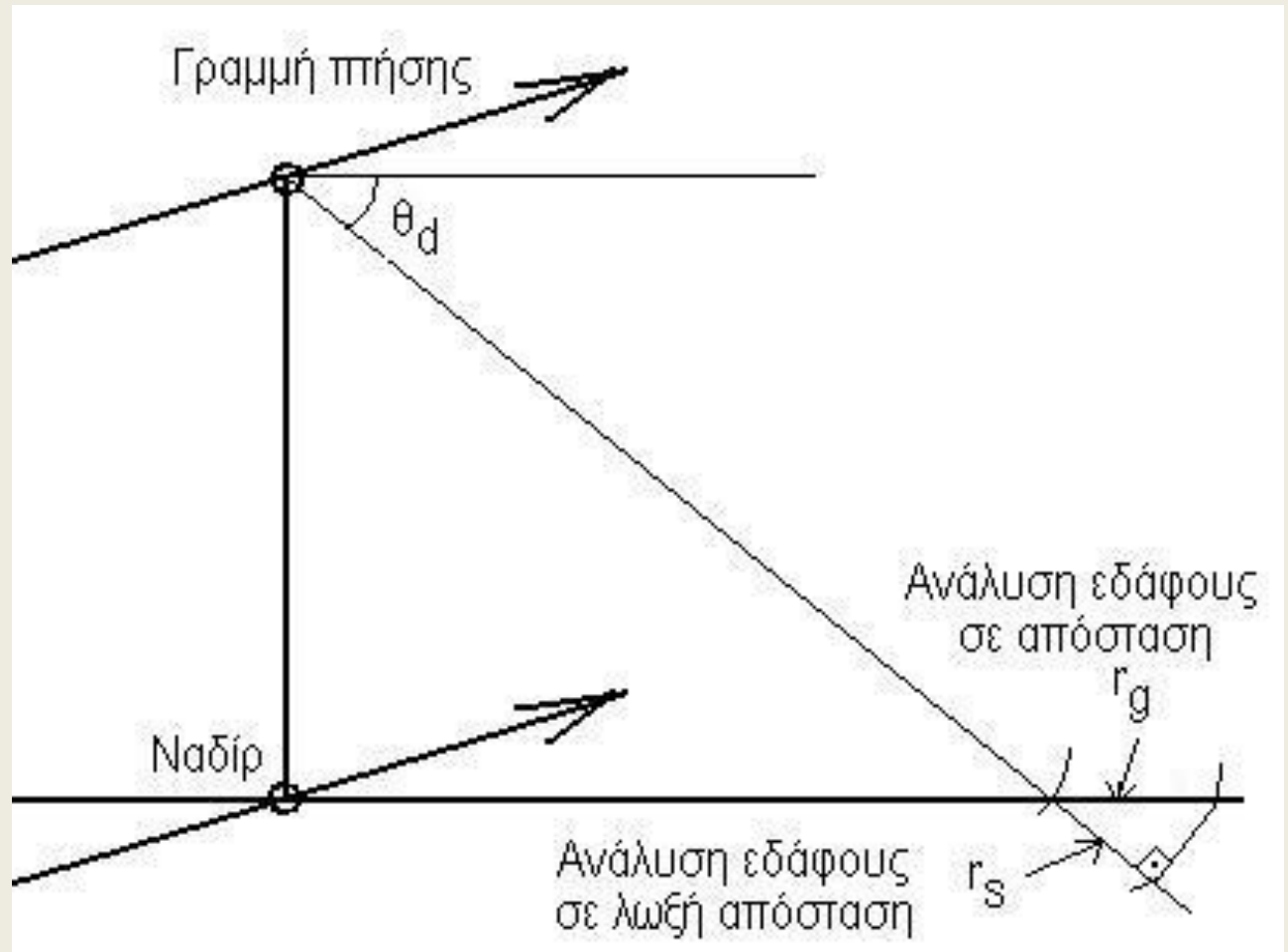
...Ορολογία radar





Σχήμα 6.4 Η γωνία παρατήρησης και η γεωμετρία της σάρωσης του Radar.

$$S_r = \frac{ct}{2}$$



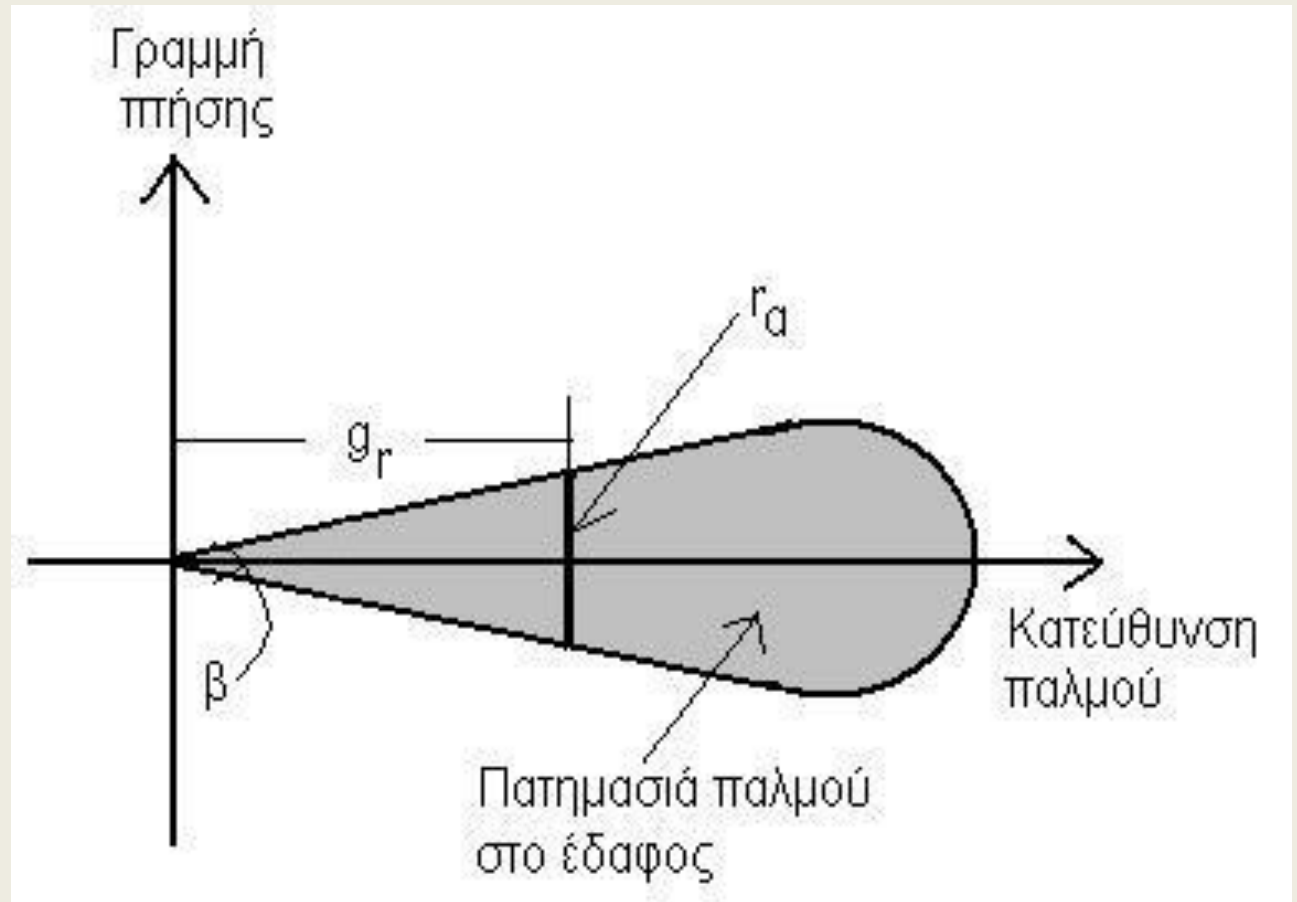
$$r_s = \frac{ct}{2}, \quad r_g = \frac{ct}{2\cos(\theta_d)}$$

α = μήκος κεραίας

$$r_\alpha = g_r \cdot \beta$$

$$\beta = \frac{\lambda}{\alpha}$$

$$\frac{P_t}{4\pi R^2}$$



Η ισχύς που εκπέμπεται από την κεραία

$$E_t = \frac{P_t}{4\pi R^2} G_t \text{ [watt / m}^2\text{]}$$

όπου G_t είναι συνάρτηση (σταθερά) της κεραίας
 $t \rightarrow$ transmitted

Η ισχύς P_s που ανακλάται από το στόχο είναι:

$$P_s = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \delta [\text{watt}]$$

Όπου δ είναι η διατομή «ραντάρ» του στόχου η οποία επηρεάζεται από τους εξής παράγοντες:

- (α) Το μέγεθος του στόχου
- (β) τη γωνία όρασης του στόχου από την κεραία
- (γ) Το υλικό του στόχου
- (δ) Το μήκος κύματος του παλμού
- (ε) Την πόλωση του παλμού
- (στ) Το αζιμούθιο
- (ζ) Τον προσανατολισμό του στόχου

όπου G_r είναι
συνάρτηση
(σταθερά) της
κεραίας
 $r \rightarrow$ received

Η ισχύς P_r που φθάνει στην κεραία δίνεται από τη σχέση:

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \delta \frac{1}{4\pi R^2} A_e$$

Όπου A_e είναι η
ωφέλιμη επιφάνεια της
κεραίας και δίνεται από
τη σχέση:

$$A_e = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi}$$

όπου G_r είναι συνάρτηση της κεραίας και επειδή χρησιμοποιείται η ίδια κεραία έχουμε:

$$G_t = G_r = G \quad \text{οπότε προκύπτει:}$$

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2}{4\pi^3 R^4} \delta$$

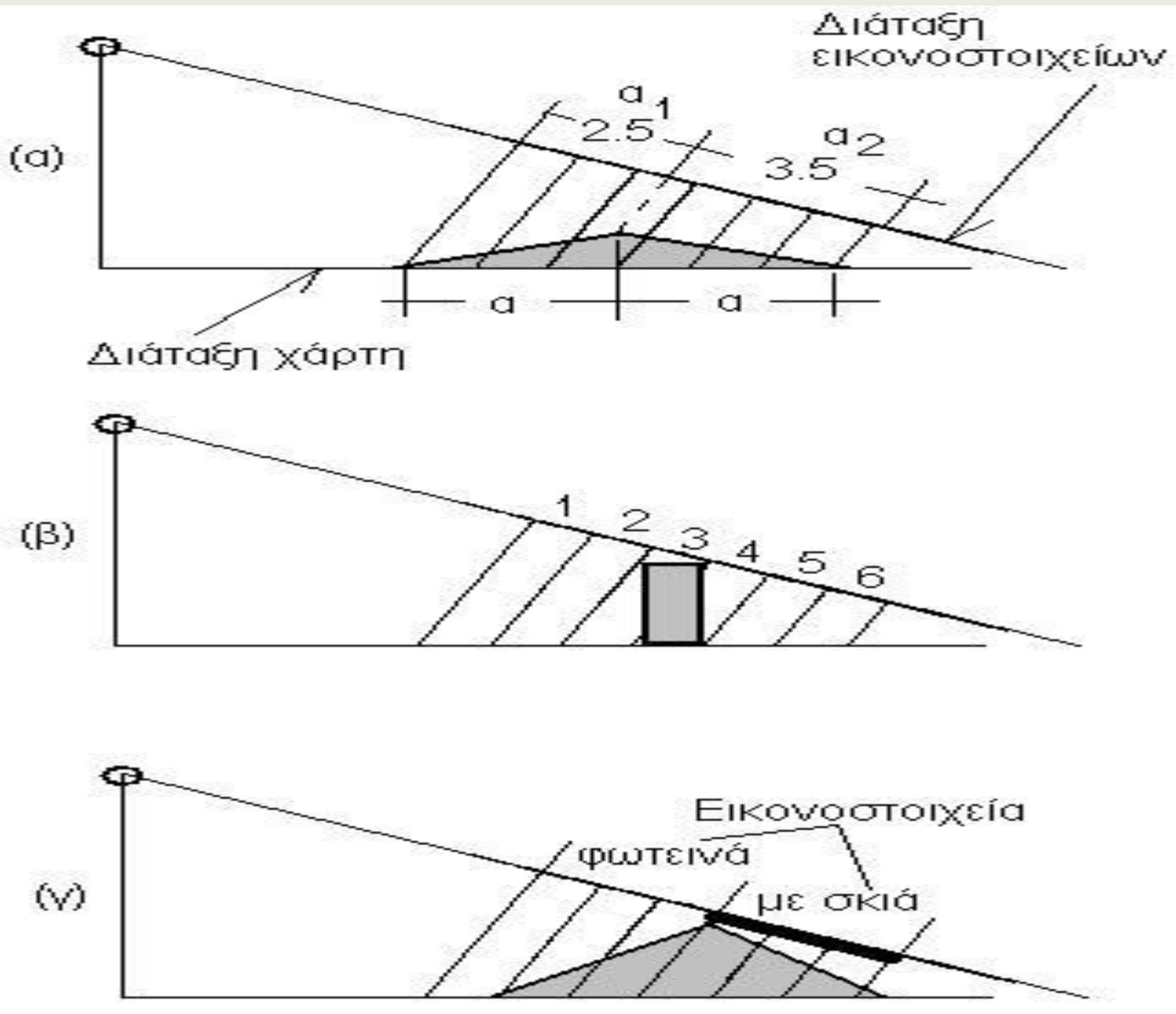
Στην σχέση αυτή όλες οι παράμετροι είναι γνωστές στο σύστημα εκτός της παραμέτρου δ η οποία εξαρτάται από το στόχο στο έδαφος ο οποίος εκτός των παραγόντων ($\alpha, \beta, \dots, \zeta$) που αναφέρθηκαν πιο πάνω που μπορούν να θεωρηθούν επίσης μεταβλητές του συστήματος, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που είναι μεταβλητές που αναφέρονται στις ιδιότητες του στόχου όπως:

- (α) Τραχύτητα της επιφάνειας
- (β) Υγρασία εδάφους
- (γ) κάλυψη βλάστησης
- (δ) τοπογραφία μικροκλίμακας

Η λήψη επίσης του παλμού μπορεί να είναι είτε σε Η είτε σε V πόλωση οπότε προκύπτουν οι συνδυασμοί εικονοληψίας ανάλογα βέβαια και με τις δυνατότητες του συστήματος:

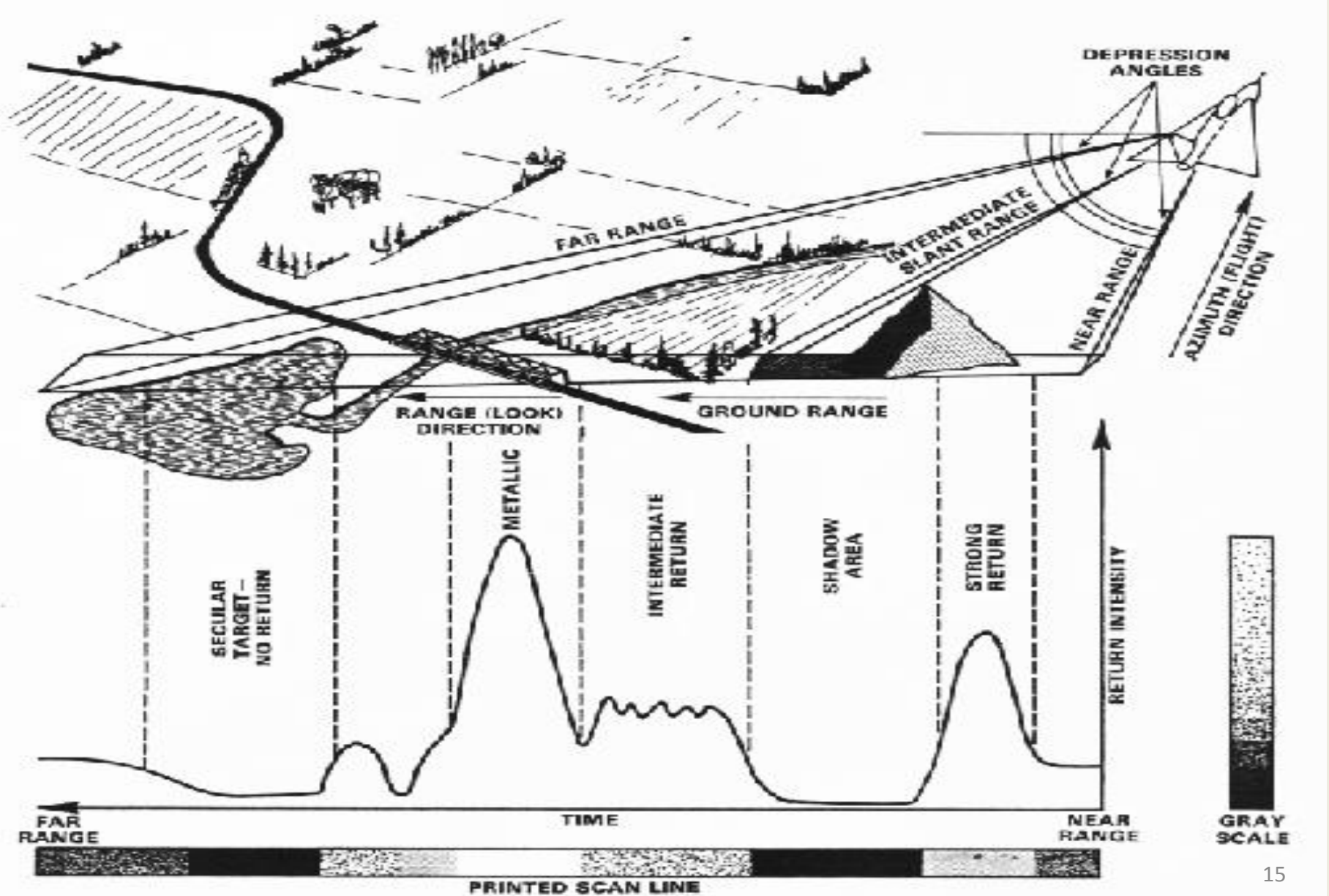
HH, HV, VH, VV

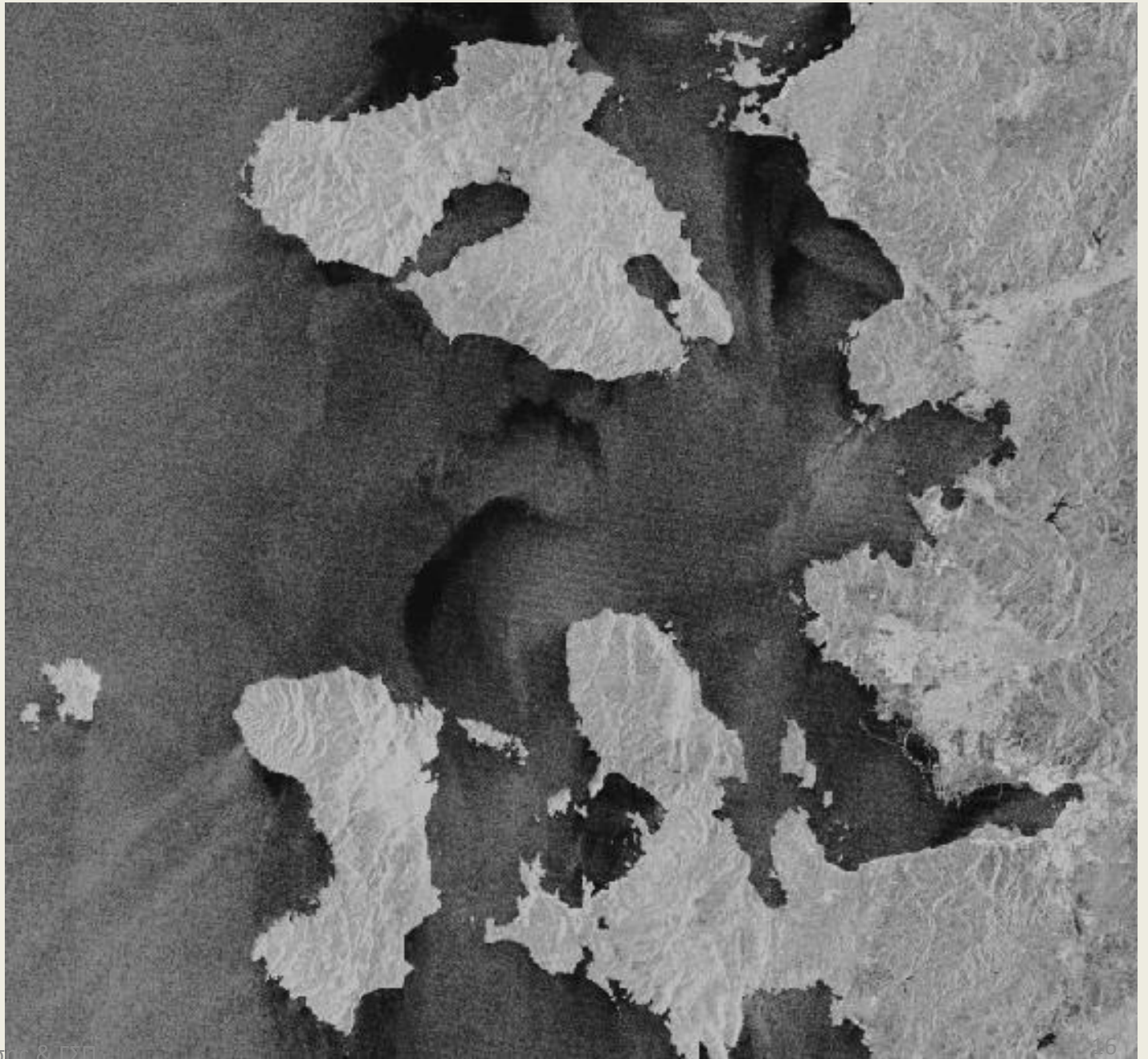
Μετατόπιση λόγω αναγλύφου



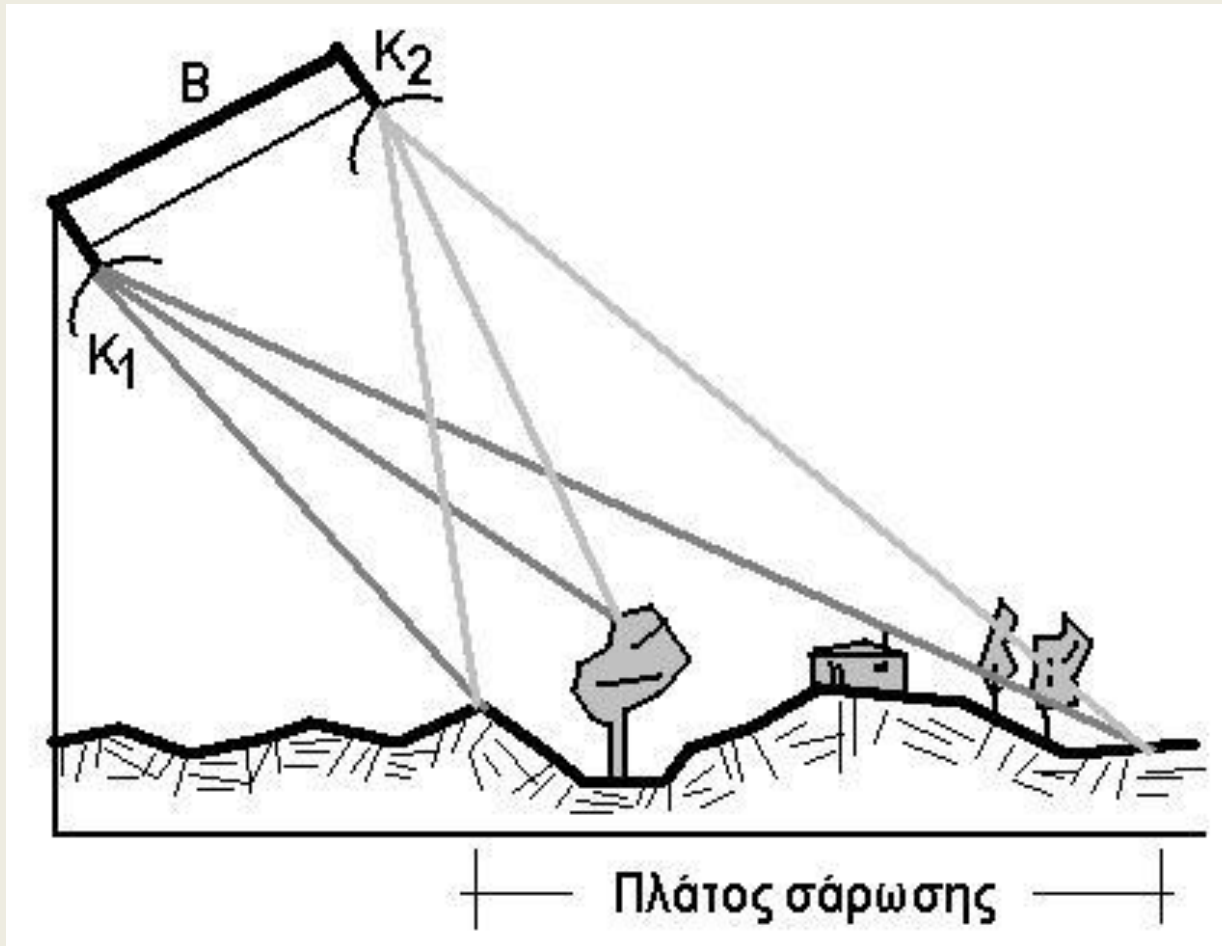
Μετατόπιση λόγω αναγλύφου:
(α) εμπροσθοσμίκρυνση (*forthshortening*) και επιμήκυνση (*lengthening*), (β) επικάλυψη (*layover*) 3° εικονοστοιχείο ενώ η βάση του είναι στο 4° , (γ) σκίαση.

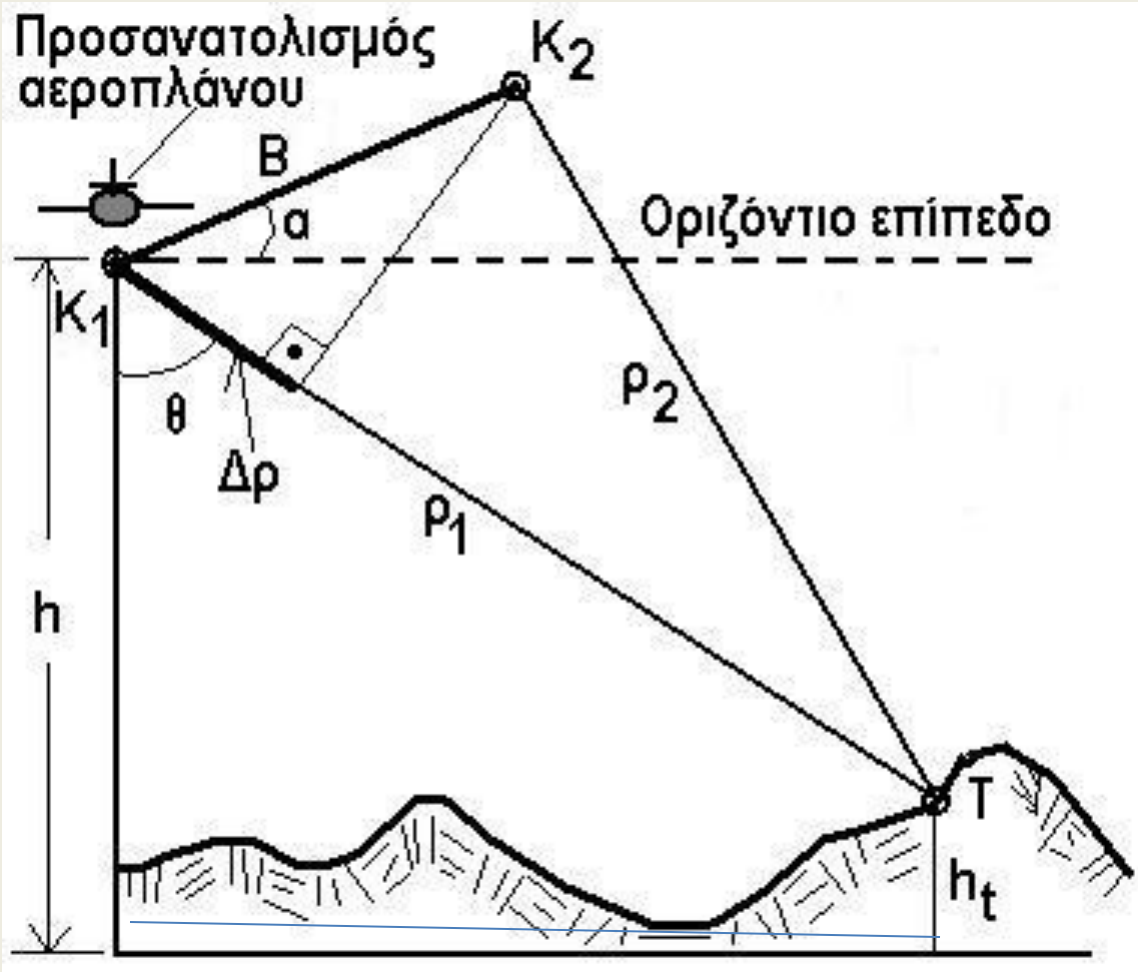
Συνοπτική παρουσίαση:





Ραντάρ συνθετικού διαφράγματος συμβολομετρίας (IfSAR)





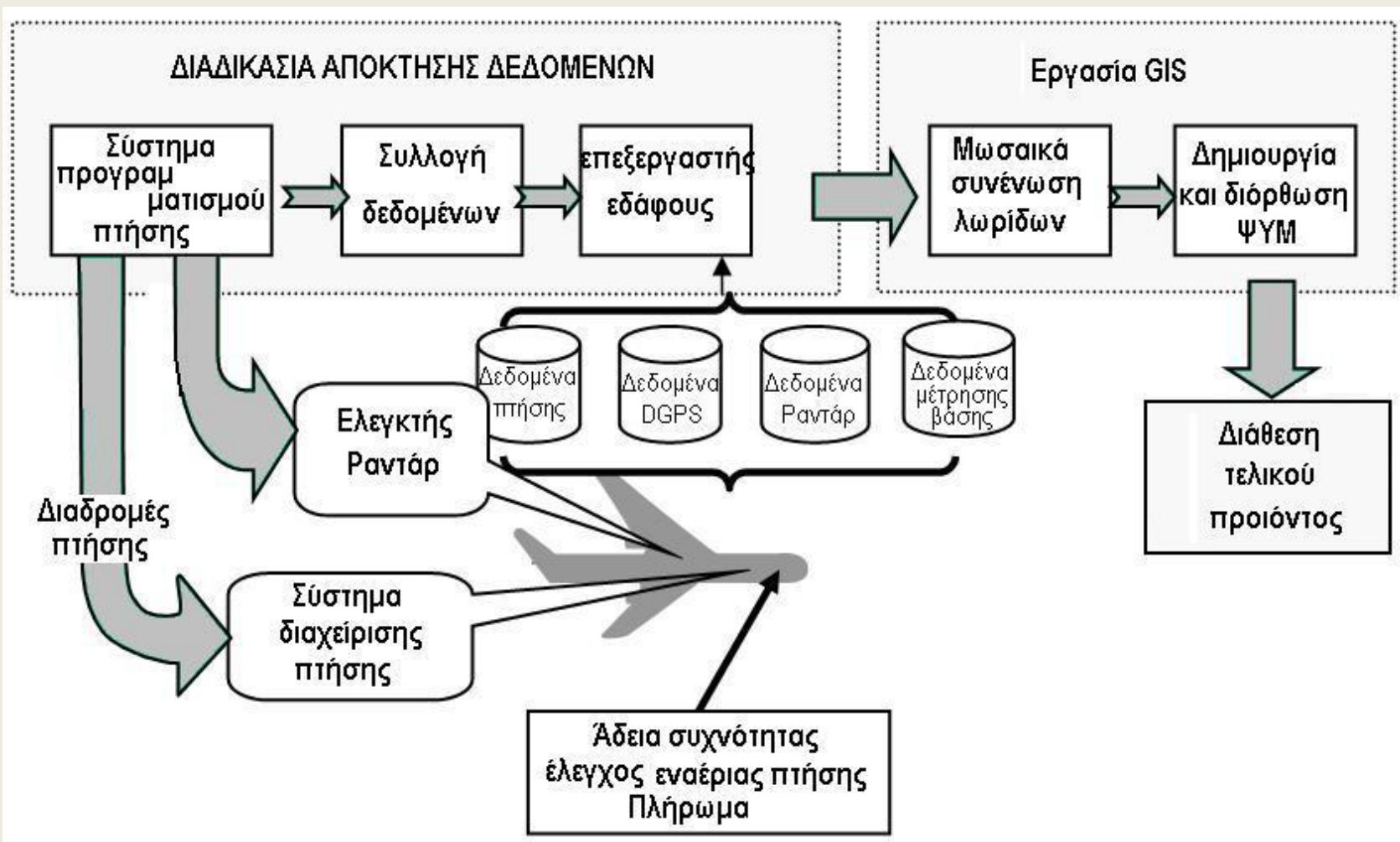
$$\varphi = 4\pi \frac{\Delta\rho}{\lambda}$$

$$\Delta\rho = |\vec{\rho}_1| - |\vec{\rho}_2| \eta$$

$$\Delta\rho = B \cdot \eta \mu(\theta - \alpha)$$

$$h_t = h - \rho \cdot \text{συν}(\theta)$$

$$\vartheta = \text{τοξημ}\left(\frac{\lambda\varphi}{4\pi B}\right) + \alpha$$



Μέθοδοι

(α) Εκπομπή απλής κεραίας (*Single antenna transmit – SAT*) όπου μία κεραία εκπέμπει και δύο κεραίες λαμβάνουν. Η διαφορά φάσης με τη μέθοδο αυτή υπολογίζεται:

$$\delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} [\rho_1 + \rho_1 - (\rho_1 + \rho_2)] = \frac{2\pi}{\lambda} (\rho_1 - \rho_2)$$

(β) Μέθοδος πινγκ πονγκ, όπου οι δύο κεραίες εκπέμπουν και λαμβάνουν τον δικό τους παλμό. Η διαφορά φάσης με τη μέθοδο αυτή υπολογίζεται:

$$\delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} [\rho_1 + \rho_1 - (\rho_2 + \rho_2)] = \frac{4\pi}{\lambda} (\rho_1 - \rho_2)$$

(γ) Επαναλαμβανόμενη πτήση, η οποία χρησιμοποιεί αεροπλάνο ή δορυφόρο με ένα απλό SAR το οποίο περνά πάνω από την ίδια περιοχή δύο ή και περισσότερες φορές σε δύο κατά το δυνατόν παράλληλες γραμμές πτήσεις ή παράλληλες τροχιές.

GeoSar



Προϊόντα του συστήματος αυτού είναι τα εξής:

P-Band Radar ΨΥΜ

P-Band Εικόνα HH

P-Band Εικόνα HV

P-Band Συσχετισμός

P- and X-Band συνδυασμένο ΨΥΜ

X-Band Εικόνα VV

X-Band Συσχετισμός

X-Band Radar ΨΥΜ

Υψομετρική ακρίβεια

P-Band 15 % του ύψους δένδρου

X-Band

1m στα 10km πτήσης

0.7m στα 5km πτήσης

Οριζοντιογραφική ακρίβεια

P Band

4m στα 10 km πτήσης

2 m στα 5 km πτήσης

X-Band

1m στα 10 km πτήσης

0.7m στα 5 km πτήσης

- Τα προϊόντα που αναπτύσσονται έχουν το πλείστον τις εξής χρήσεις:
- Παραγωγή ορθοφωτογραφιών
- Τοπογραφία
- Τοπογράφηση χρήσεων γης, κάλυψη γης
- Τοπογράφηση δρόμων
- Τοπογράφηση υδρολογικού δικτύου
- Τοπογράφηση κτιρίων
- Τοπογράφηση βλάστησης
- Τοπογράφηση πυκνότητας βλάστησης και βιομάζας
- Υδρολογικά μοντέλα
- Τοπογράφηση σεισμικών καταστροφών
- Ταξινόμηση ορυκτών πόρων
- Εντοπισμός εγκαταλελειμμένων ορυχείων και λατομείων
- Διατήρηση της φύσης
- Διατήρηση αγροτικής γης

Εισροές

Φόρμες αρχείων Radar

GeoSAR P-Band (dte,mag,cor)
GeoSAR X-Band (dte,mag,cor)
GeoSAR X and P-Band (dte)
TOPSAR(dte,mag,cor)
IFSARE (dte,mag,cor)

Άλλες φόρμες αρχείων

USGS DEM
DTED
TIFF
GeoTIFF
Raw Binary
Raw ASCII

Προδιαγραφές του χρήστη

Γραμμή
Διαλόγου

Λειτουργία σταθμού εργασίαςGIS

Παρουσίαση δεδομένων
Διαχείριση πλακιδίων*
Μετατροπή συντεταγμένων
Γεωαναφορά
Χάρτες κλίσεων εδάφους
Ισοϋψείς καμπύλες
Χάρτες διαφορών
Ταξινόμηση
Μηκοτομές
Συμπλήρωση λάκκων**
Συμπλήρωση εκτάσεων**
Ελάττωση θορύβου
Απομάκρυνση συστηματικών λαθών
Δημιουργία μωσαικού
Διαχείριση δεδομένων και αποθήκευση
Data Queries
Data Extraction

Αρχεία με παραμέτρους των συστημάτων αναφοράς

Παράμετροι προβολής
Γεωγραφικοί παράμετροι
Παράμετροι ελλειψοειδούς
Vertical Datum Parameters

Εκροές

USGS DEM
DTED
TIFF
GeoTIFF
Raw Binary
Raw ASCII

Βάση
Δεδομένων

	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ STAR		
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	STAR-3i	TopoSAR	STAR-4
Αεροπλάνο	Learjet 36A	Aero Commander 690-1000	King Air 200
Τυπική ταχύτητα	750 km/hour	400 km/hour	400 km/hour
Τυπικό ύψος Πτήσης πάνω Από τη θάλασσα	3 – 10 km	3 – 9 km	3 – 9 km
Εύρος σάρωσης	3 – 10 km*	3 – 8 km*	8 – 11 km*
Κεντρική συχνότητα	9.57 GHz (X-Band)	9.55 GHz (X-Band)	9.58 GHz (X-Band)
Διάστημα και εύρος μπάντας	67.5 & 135 MHz	Up to 400 MHz	67.5, 135 & 270 MHz
Ύψος κεραίας	30 – 60°	30 – 60°	30 -60°
Πόλωση	HH	HH	HH
Βάση IFSAR	0.9 m	0.6 or 1.8 m	0.98 m
Καλύτερη ανάλυση εικόνας	1.25 m	0.5 m	Typical 1.25 m Up to 0.5m**



(a) TopoSTAR

(β) START - 3i

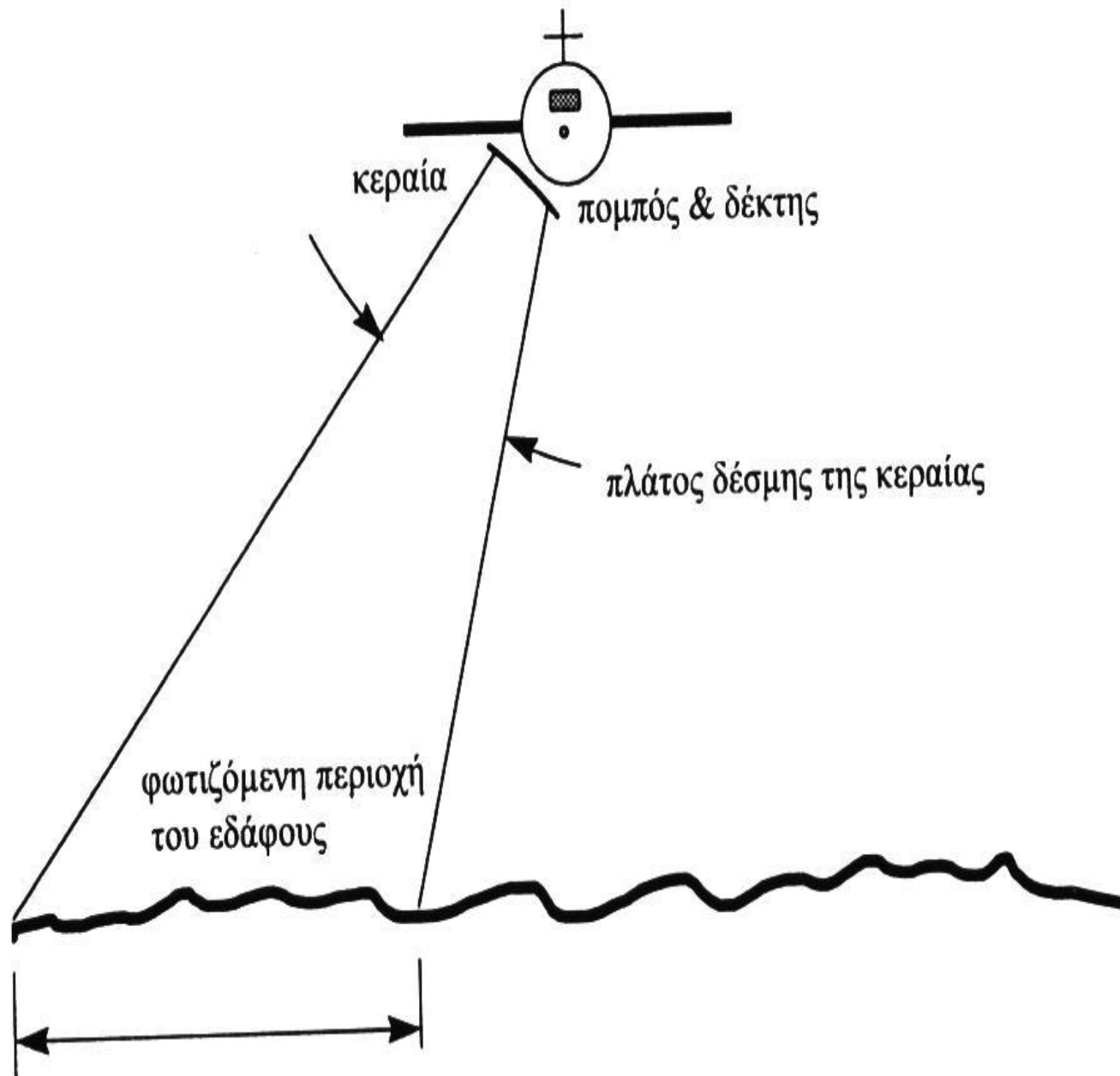
(γ) STAR - 4

Όνομασία ζώνης	Συχνότητα	Ζώνη μήκους κύματος λ	Συμβατικές ζώνες Radar
Ka	26,5–40 GHz	0,75–1,1 cm	0,86 cm
K	18–25,5 GHz	1,1–1,67 cm	
Ku	12,5–18 GHz	1,7–2,4 cm	
X	8–12,5 GHz	2,4–3,8 cm	3–3,2 cm
C	4–8 GHz	3,8–7,5 cm	6 cm
S	2–4 GHz	7,5–15,0 cm	
L	1–2 GHz	15–30 cm	23,5 cm 24cm 25cm
P	300 MHz–1 GHz	30–100 cm	68 cm

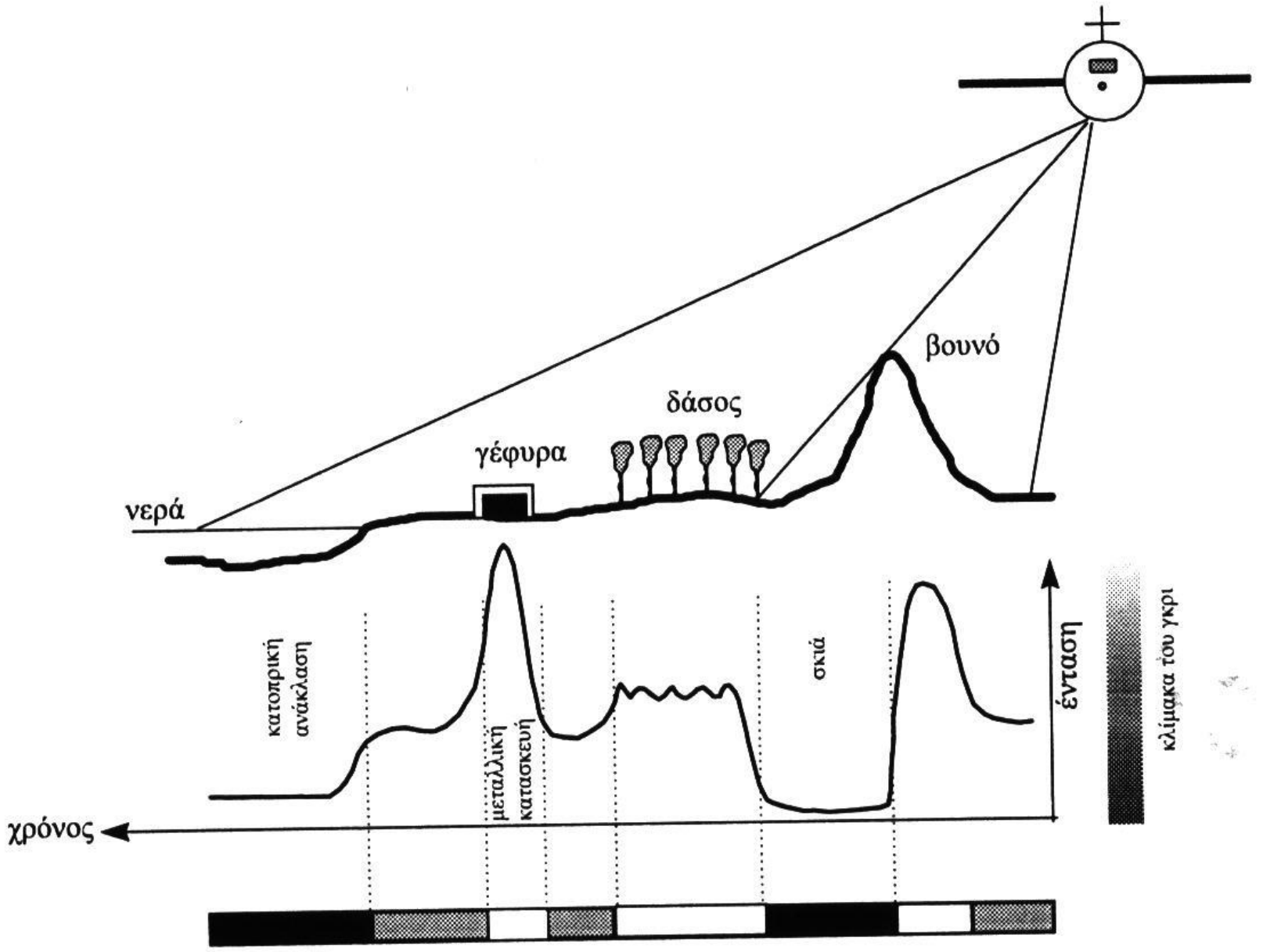
Πίνακας 6.1 Ονομασία και μήκη κύματος των Radar.

Κάθε συχνότητα ν της ακτινοβολίας σε [GHz] μπορεί να μετατραπεί σε μήκος κύματος σε [cm] σύμφωνα με τη σχέση:

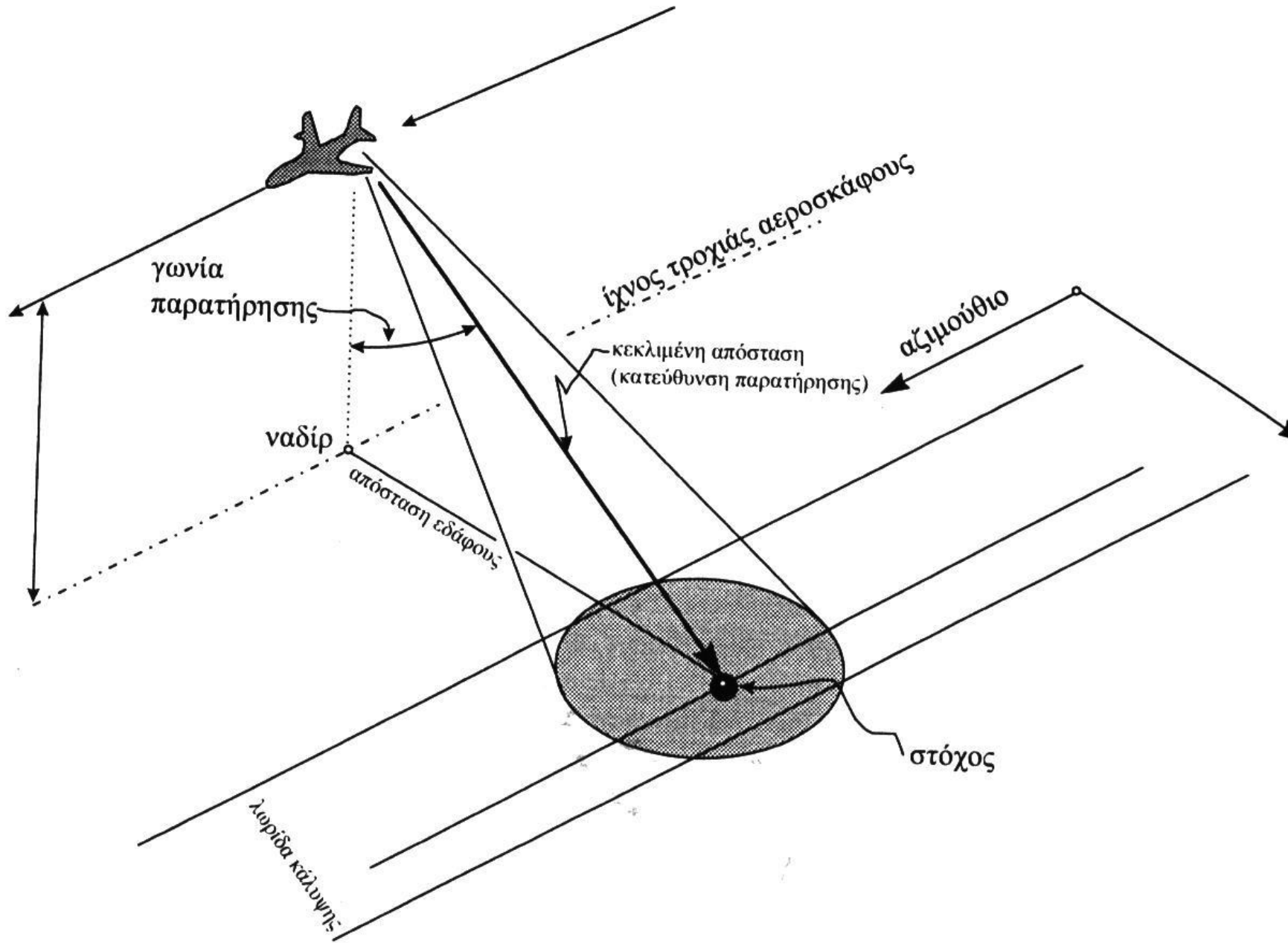
$$\nu[\text{GHz}] = \frac{30}{\lambda[\text{cm}]} \quad (6.1)$$



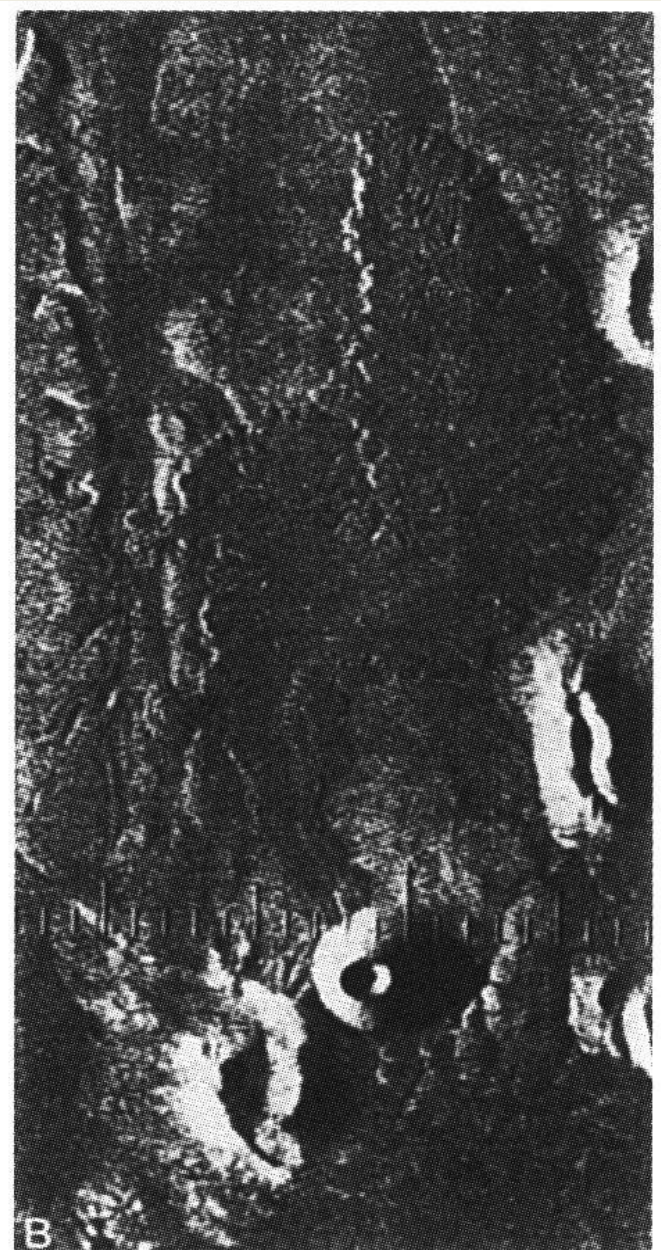
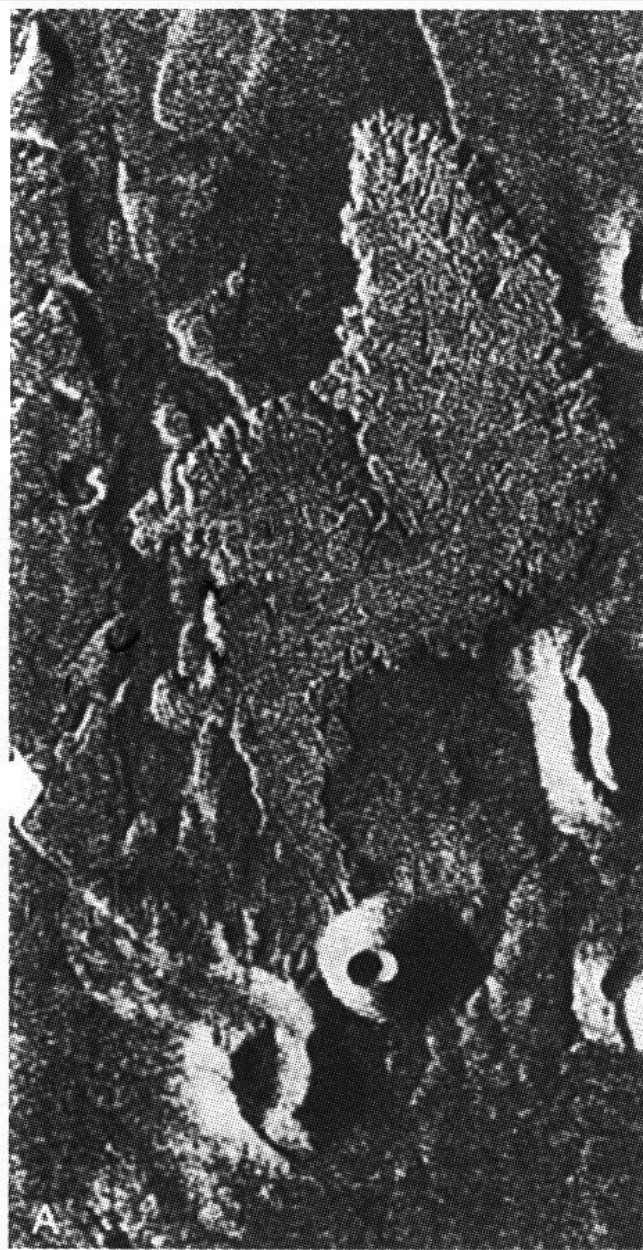
Σχήμα 6.1 Τα Radar πλευρικής κάλυψης SLAR.



Σχήμα 6.3 Η αρχή λειτουργίας του Radar.



Σχήμα 6.4 Η γωνία παρατήρησης και η γεωμετρία της σάρωσης του Radar.



Σχήμα 6.5 Εικόνες RAR ροής λάβας σε καταγραφή HH (αριστερή εικόνα A) και HV (δεξιά εικόνα B)

Ταχύτητα διάδοσης v σε μέσο

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} \quad (6.2)$$

όπου μ είναι η μαγνητική διαπερατότητα (permeability) (που σχετίζεται με τις μαγνητικές ιδιότητες της ύλης) και ϵ είναι η διηλεκτρική σταθερά (permittivity) του μέσου (που σχετίζεται με τις ηλεκτρικές ιδιότητες). Για τον αέρα, έχουμε:

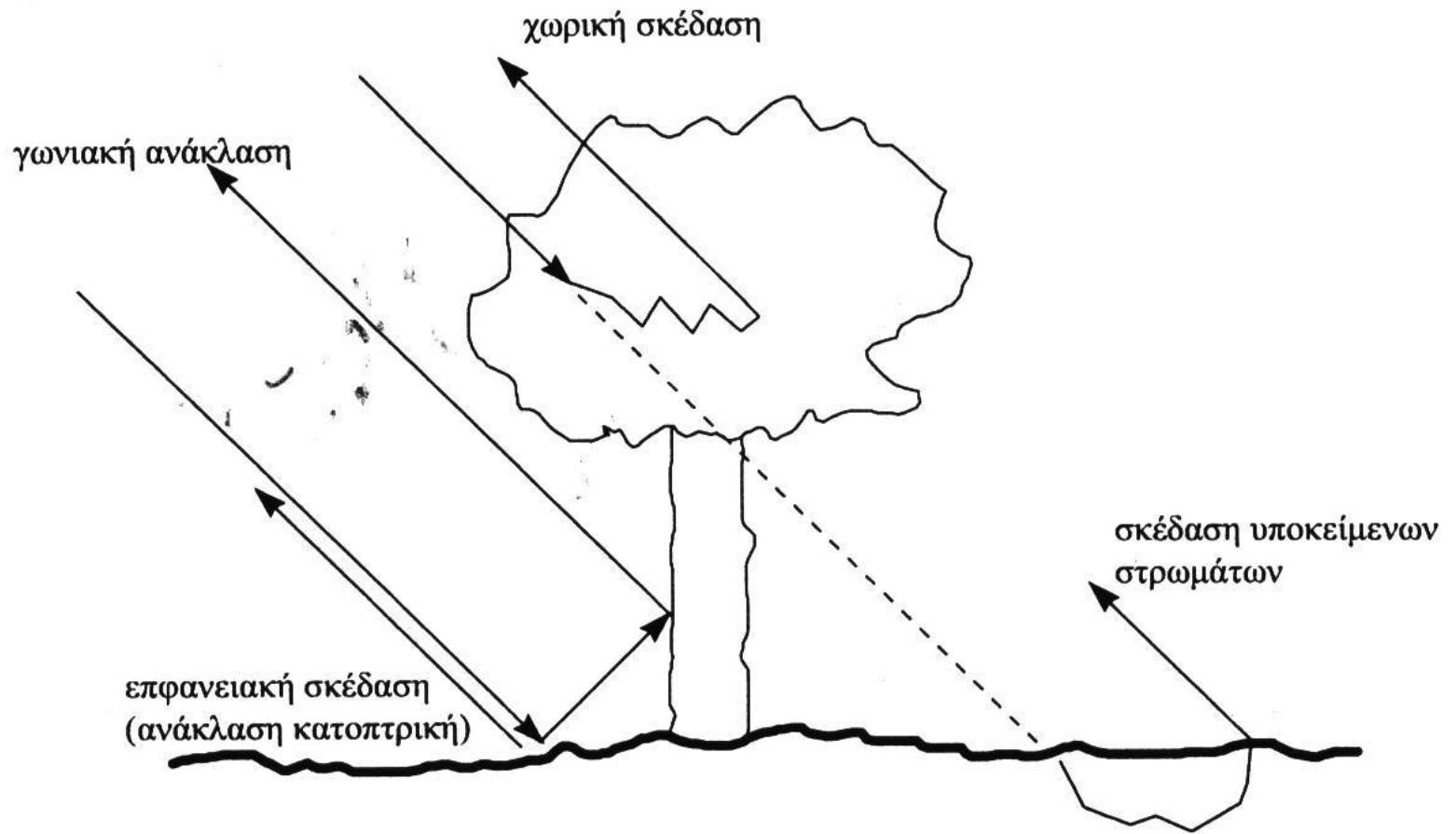
$$\begin{aligned} \epsilon &= \epsilon_0 = 8,85418 \times 10^{-12} \quad [\text{C}^2/(\text{N} \cdot \text{m})] \\ \mu &= \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \quad [\text{Wb}/(\text{A} \cdot \text{m})] \end{aligned} \quad (6.3)$$

που δίνει τιμή για την ταχύτητα στο κενό $v_0 = 300.000 \text{ m/s}$. Στην Τηλεπισκόπηση, το ενδιαφέρον έγκειται στα μη μαγνητικά υλικά· έτσι ως τιμή για τη μαγνητική διαπερατότητα μ μπορεί να θεωρηθεί η τιμή μ_0 του ατμοσφαιρικού αέρα. Όμως τα περισσότερα επιφανειακά υλικά της γης εμφανίζουν διηλεκτρικές σταθερές υψηλότερες του κενού (δηλαδή $\epsilon \geq \epsilon_0$). Ορίζουμε ως διηλεκτρική σταθερά ϵ_r ενός μέσου την ποσότητα:

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (6.4)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r}} = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{v_0}{\eta} \quad (6.5)$$

όπου $\eta = \sqrt{\epsilon_r}$ ο δείκτης διάθλασης του μέσου.



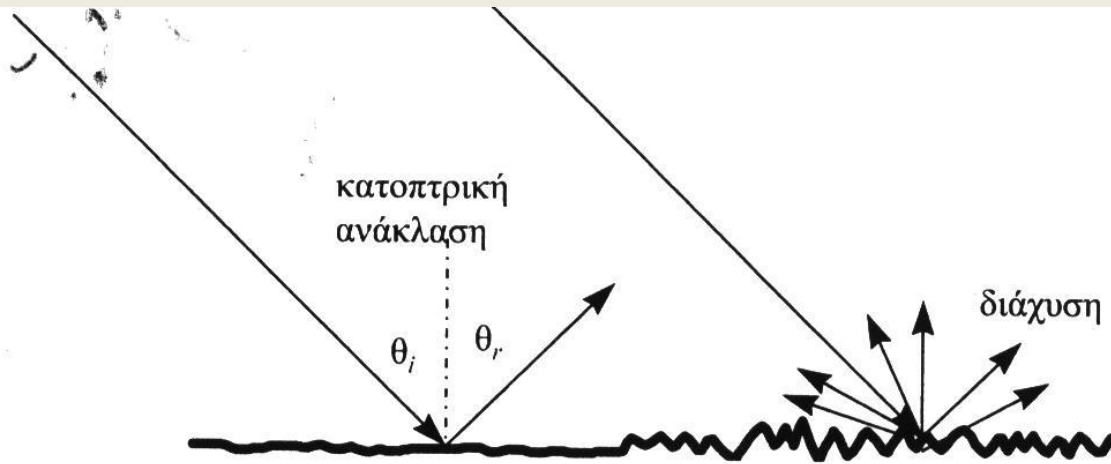
Σχήμα 6.6 Οι μηχανισμοί της σκέδασης στα μικροκυματικά Radar.

ισούται με τη γωνία ανάκλασης θ_r (Σχήμα 6.7). Το επίπεδο της ανακλώμενης ισχύος σε σχέση με την ισχύ της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια εκφράζεται από τον συντελεστή ρ της ανάκλασης:

$$\rho = |R|^2 \quad (6.6)$$

όπου R είναι ο συντελεστής ανάκλασης κατά Fresnel της επιφάνειας αέρα-εδάφους. Στην περίπτωση της κάθετης ανάκλασης ($\theta = 0^\circ$) και θεωρώντας ότι το έδαφος δεν προκαλεί απώλειες στην προσπίπτουσα ακτινοβολία, ο συντελεστής ανάκλασης είναι (Elachi, 1987):

$$R_N = \frac{1 - \sqrt{\epsilon_r}}{1 + \sqrt{\epsilon_r}} \quad (6.7)$$



Σχήμα 6.7 Οι επιδράσεις της τραχύτητας της επιφάνειας στην ανάκλαση.

Θεωρήστε τώρα ότι επέρχεται κατοπτρική, αλλά πλάγια, ανάκλαση, όπως φαίνεται στο αριστερό Σχήμα 6.7. Ο συντελεστής ανάκλασης R του Fresnel εξαρτάται τώρα από την πόλωση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Για οριζόντια πολικότητα:

$$R_H = \frac{\cos\theta_i - \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta_i}}{\cos\theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta_i}} \quad (6.8)$$

Εξισώσεις του Fresnel

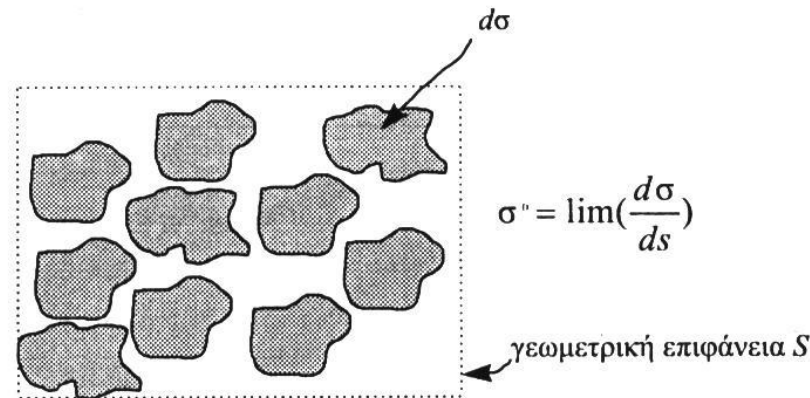
- Οι εξισώσεις του Fresnel περιγράφουν την ανάκλαση και τη διαπερατότητα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε μια επιφάνεια διασύνδεσης δύο υλικών μέσων. Με άλλα λόγια δίνουν τους συντελεστές ανακλαστικότητας και διαπερατότητας για κυματισμούς παράλληλα και κάθετα στο επίπεδο πρόσπτωσης. Για ένα σώμα με διηλεκτρική σταθερά όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο νόμος του Snell ($n = n_m(i)/n_m(\delta)$) για να συσχετίσει τη γωνία πρόσπτωσης (i) και γωνία διαπέρασης - διάθλασης (δ) με το δείκτη διάθλασης (n), οι εξισώσεις του Fresnel μπορούν να σταθούν με όρους τις γωνίες πρόσπτωσης και διαπέρασης.

$$R_r = \frac{-\varepsilon_r \cos\theta_i - \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta_i}}{\varepsilon_r \cos\theta_i + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta_i}} \quad (6.9)$$

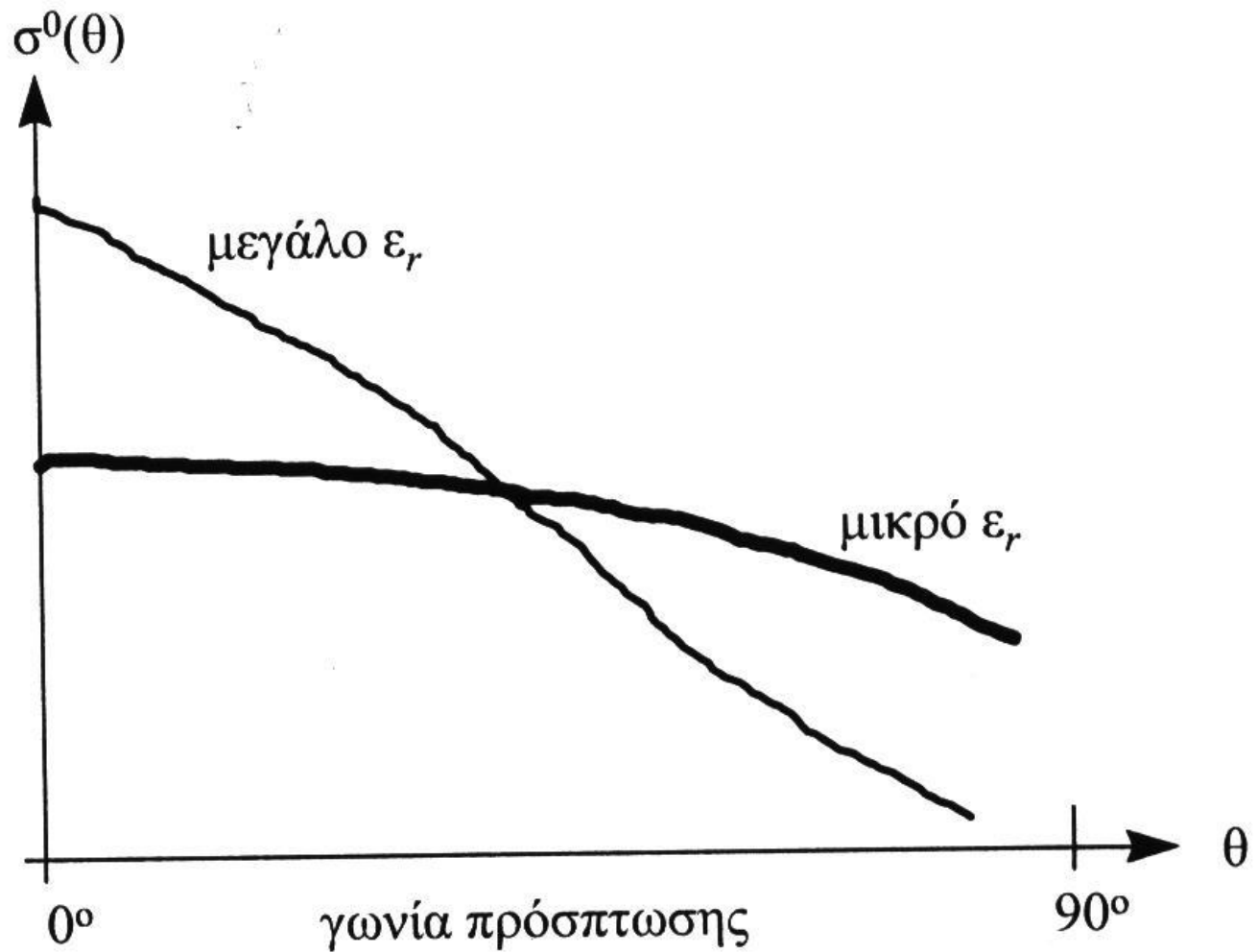
Και στις δύο περιπτώσεις η ανακλώμενη διεύθυνση είναι διαφορετική από τη διεύθυνση της πρόσπτωσης και επομένως η περιοχή αυτή στην εικόνα Radar θα εμφανίζεται σκοτεινή (μαύρη). Οι ήρεμες υδάτινες επιφάνειες αποτελούν ένα παράδειγμα τέτοιας μορφής κατοπτρικής ανάκλασης.

$$\sigma^0(\theta_i) = \sigma^0(0) \cos^2 \theta_i \quad (6.10)$$

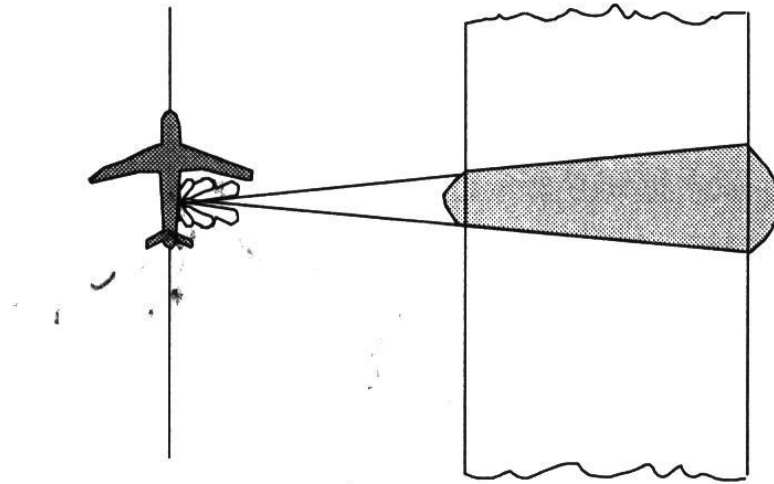
όπου $\sigma^0(0)$ είναι ο συντελεστής σκέδασης σε κάθετη πρόσπτωση ($\theta_i = 0^\circ$). Σε $\theta_i = 90^\circ$ δεν υπάρχει σκέδαση από την επιφάνεια. Αν μία δέσμη Radar προσπέσει σε επιφάνεια, τότε αυτή η επιφάνεια παρουσιάζει **ενεργό διατομή**, που είναι εκείνη η επιφάνεια που θα συλλέξει την ακτινοβολία αλλά και θα προκαλέσει τη σκέδαση. Το ποσοστό της μέσης τιμής της ενεργού διατομής της σκέδασης ως προς τη συνολική γεωμετρική διατομή της επιφάνειας ορίζει τον συντελεστή $\sigma^0(0)$ σκέδασης.



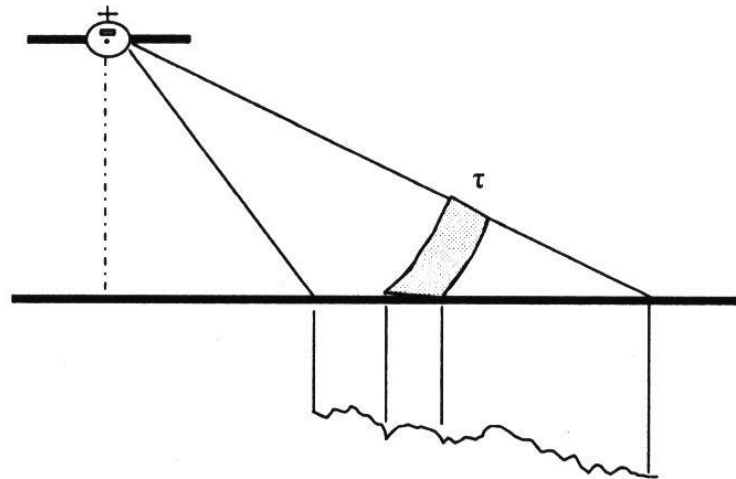
Σχήμα 6.8 Ο ορισμός της ενεργού διατομής της σκέδασης μιας επιφάνειας και ο συντελεστής σκέδασης.



Σχήμα 6.9 Η εξάρτηση του συντελεστή σκέδασης σ^0 από τη γωνία πρόσπτωσης θ .



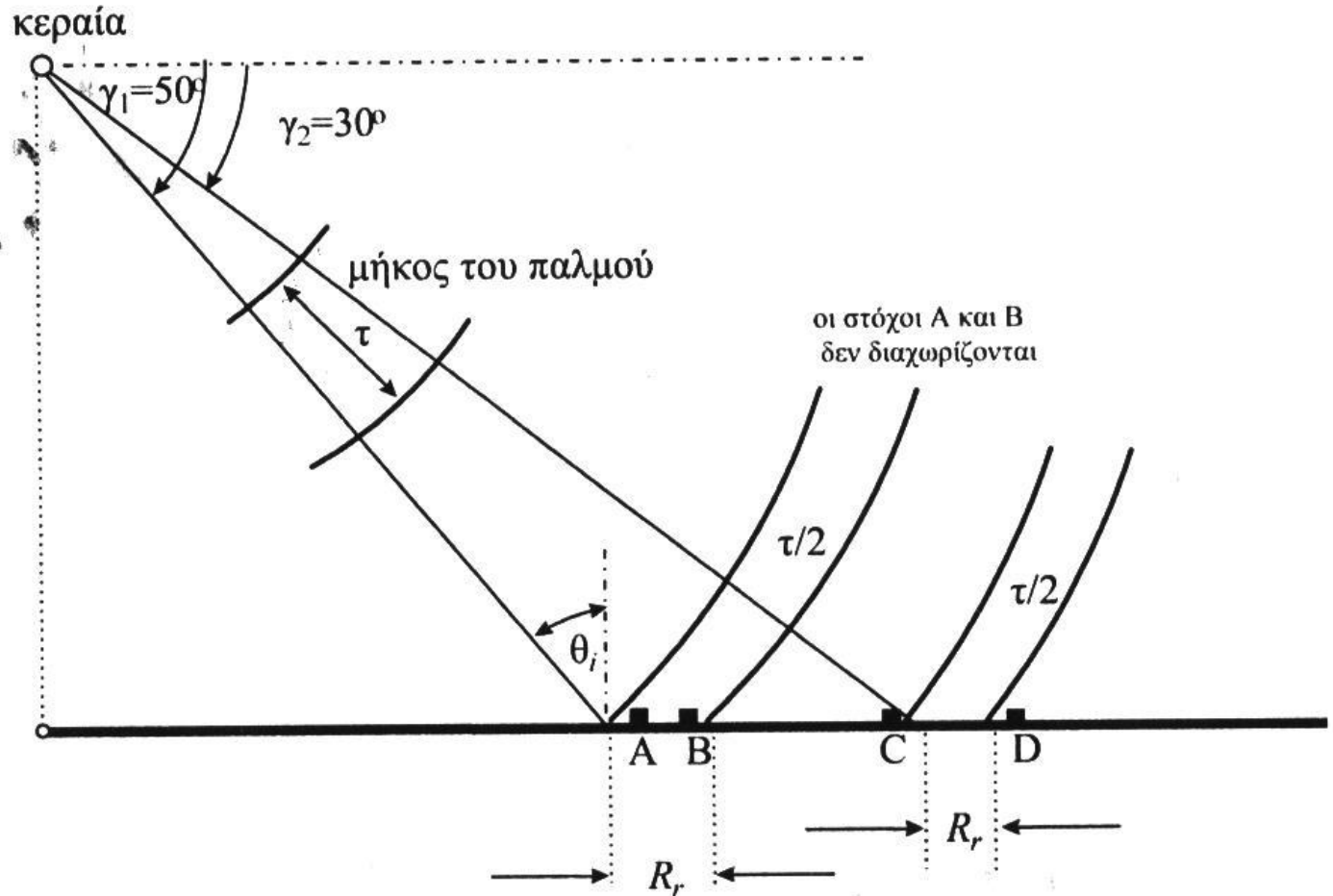
διαχωριστική ικανότητα (ή χωρική ανάλυση) στο αζιμούθιο



διαχωριστική ικανότητα (ή χωρική ανάλυση) στην απόσταση

Σχήμα 6.10 Η διαχωριστική ικανότητα (ή χωρική ανάλυση) στο αζιμούθιο και στην απόσταση.

Μήκος παλμού τ [μ -sec]



Σχήμα 6.11 Η διαχωριστική ικανότητα στην απόσταση.

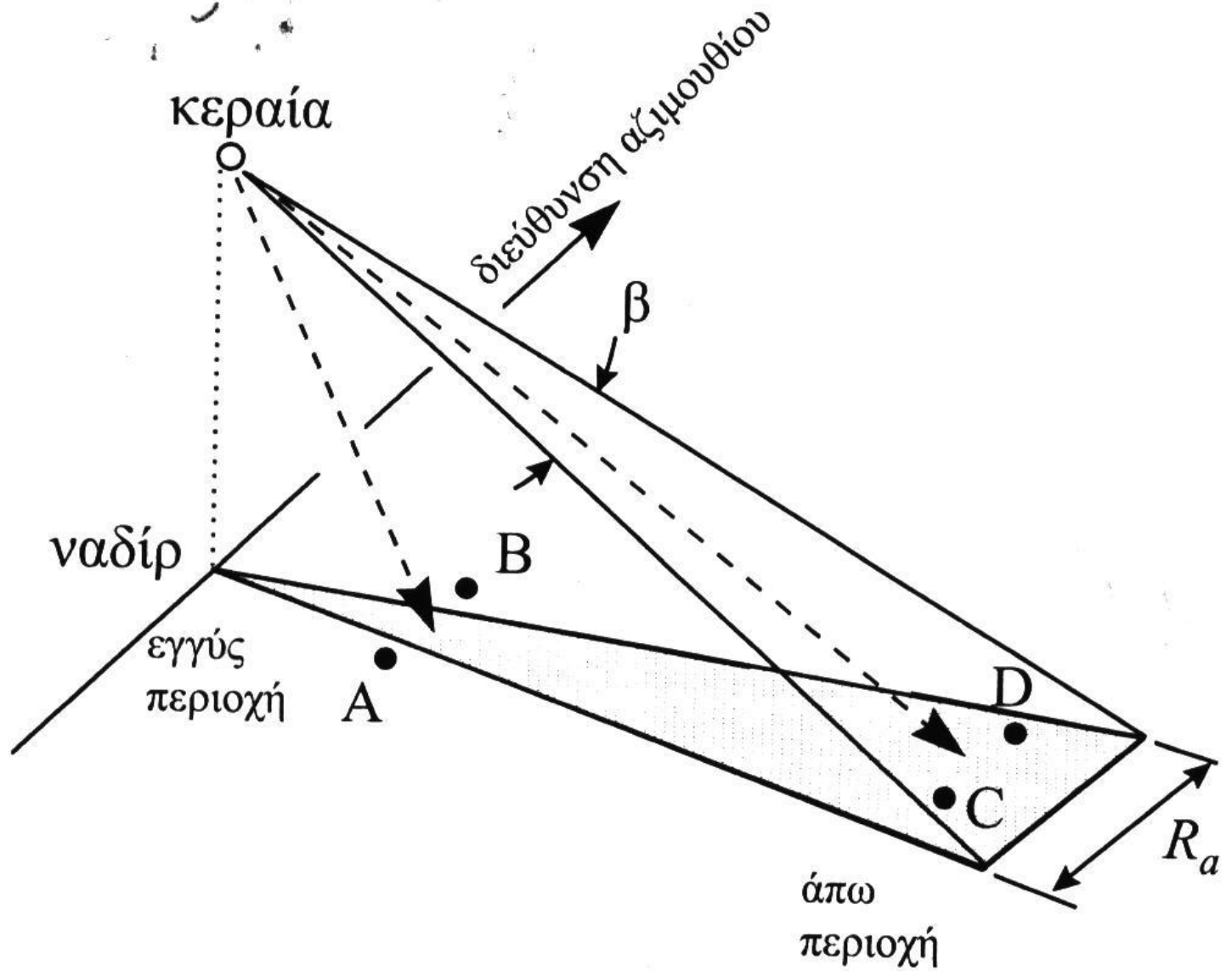
$$R_{sr} = \frac{\tau c}{2} \quad (6.11)$$

Για να μετατρέψουμε το R_{sr} σε απόσταση εδάφους R_r (οριζόντια απόσταση) έχουμε:

$$R_r = \frac{\tau c}{2 \sin \theta} \approx \frac{\tau c}{2 \cos \gamma} \quad (6.12)$$

$$R_r = \frac{\tau c}{2 \cos \gamma} = \frac{(0,1 \times 10^{-6} \text{ s}) \times (3 \times 10^8 \text{ m/s})}{2 \cos(50^\circ)} = 23,34 \text{ m} \quad (6.13)$$

Έτσι, με αυτήν τη γωνία βάθους των $\gamma = 50^\circ$, οι στόχοι πρέπει να απέχουν τουλάχιστον $L = 23 \text{ m}$ για να είναι ανιχνεύσιμοι στην εικόνα Radar.



Σχήμα 6.12 Η διαχωριστική ικανότητα στο αζιμούθιο.

$$\beta = \frac{\lambda}{D} \quad [\text{rad}] \quad (6.14)$$

Αν, για παράδειγμα, ήταν $\lambda = 0,86 \text{ cm}$ (ζώνη Ka) και $D = 490 \text{ cm}$, τότε το γωνιακό άνοιγμα β του κώνου της μικροκυματικής δέσμης θα ήταν:

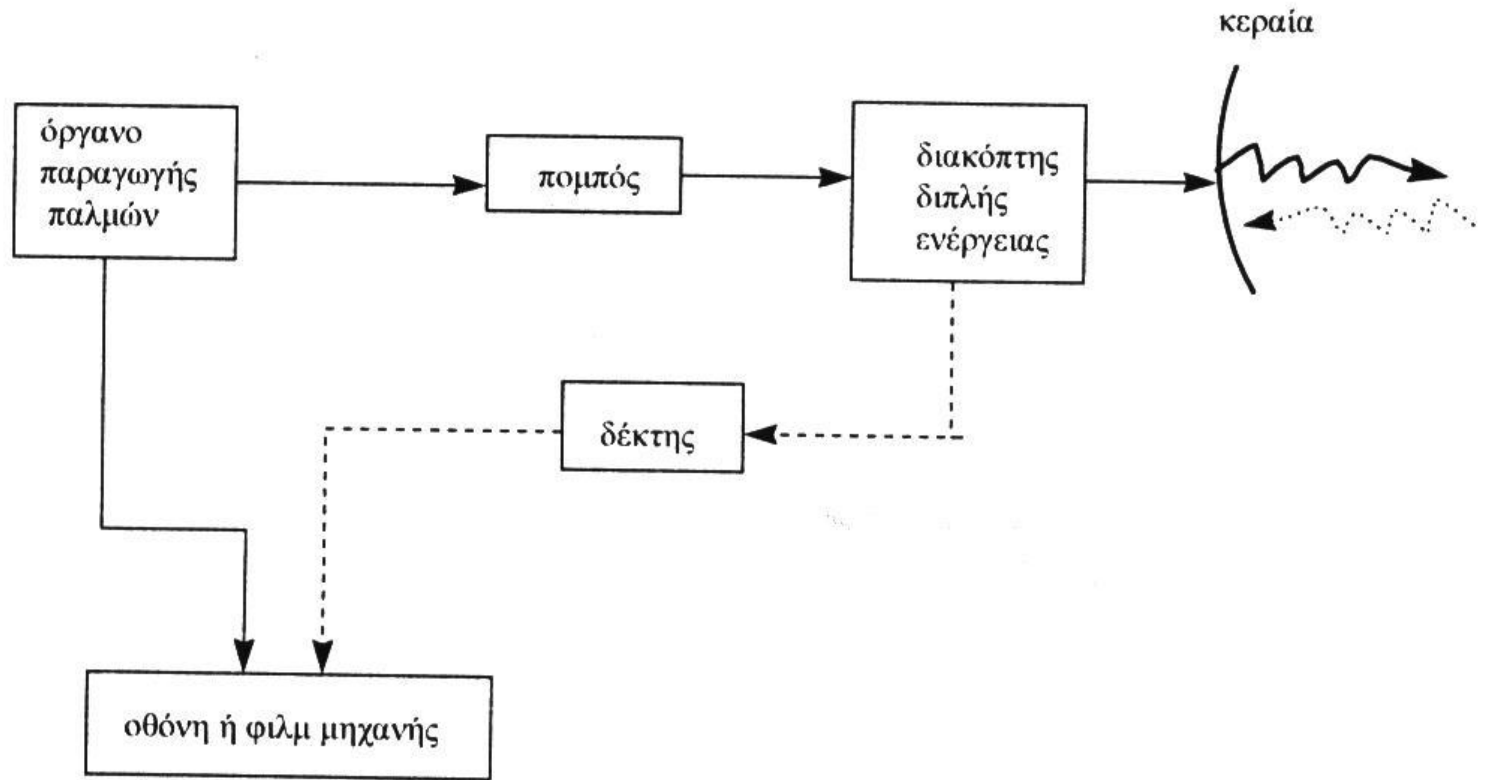
$$\beta = \frac{\lambda}{D} = \frac{0,86 \text{ cm}}{490 \text{ cm}} = 0,002 \quad [\text{rad}] \quad (6.15)$$

Η εξίσωση για τον καθορισμό της διαχωριστικής ικανότητας στο αζιμούθιο είναι:

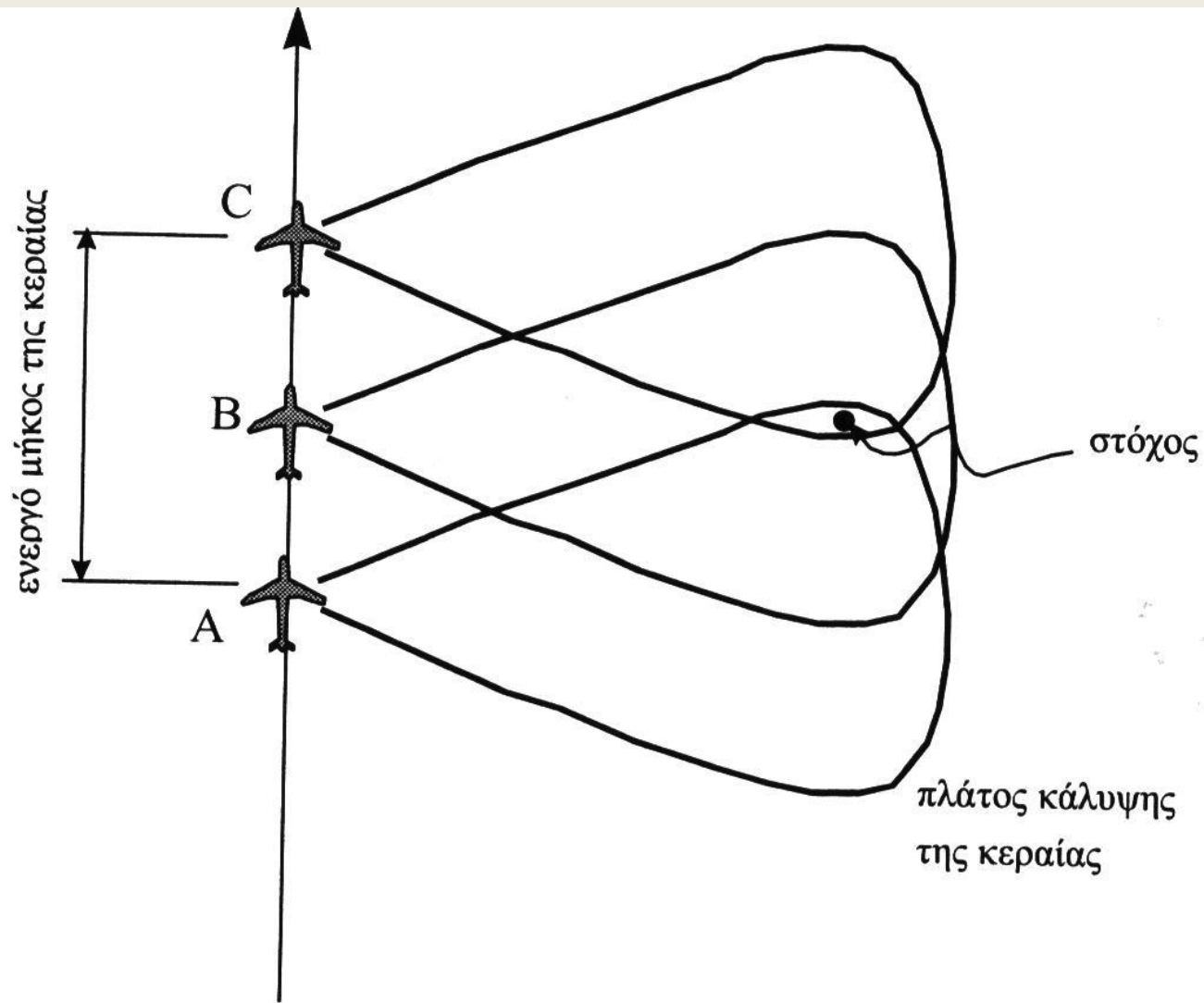
$$R_{\alpha} = \frac{0,7\lambda S}{D} \quad (6.16)$$

$$R_{\alpha} = \frac{0,7\lambda S}{D} = \frac{0,7 \times 8 \text{ km} \times 0,86 \text{ cm}}{490 \text{ cm}} = 9,8 \text{ m} \quad (6.17)$$

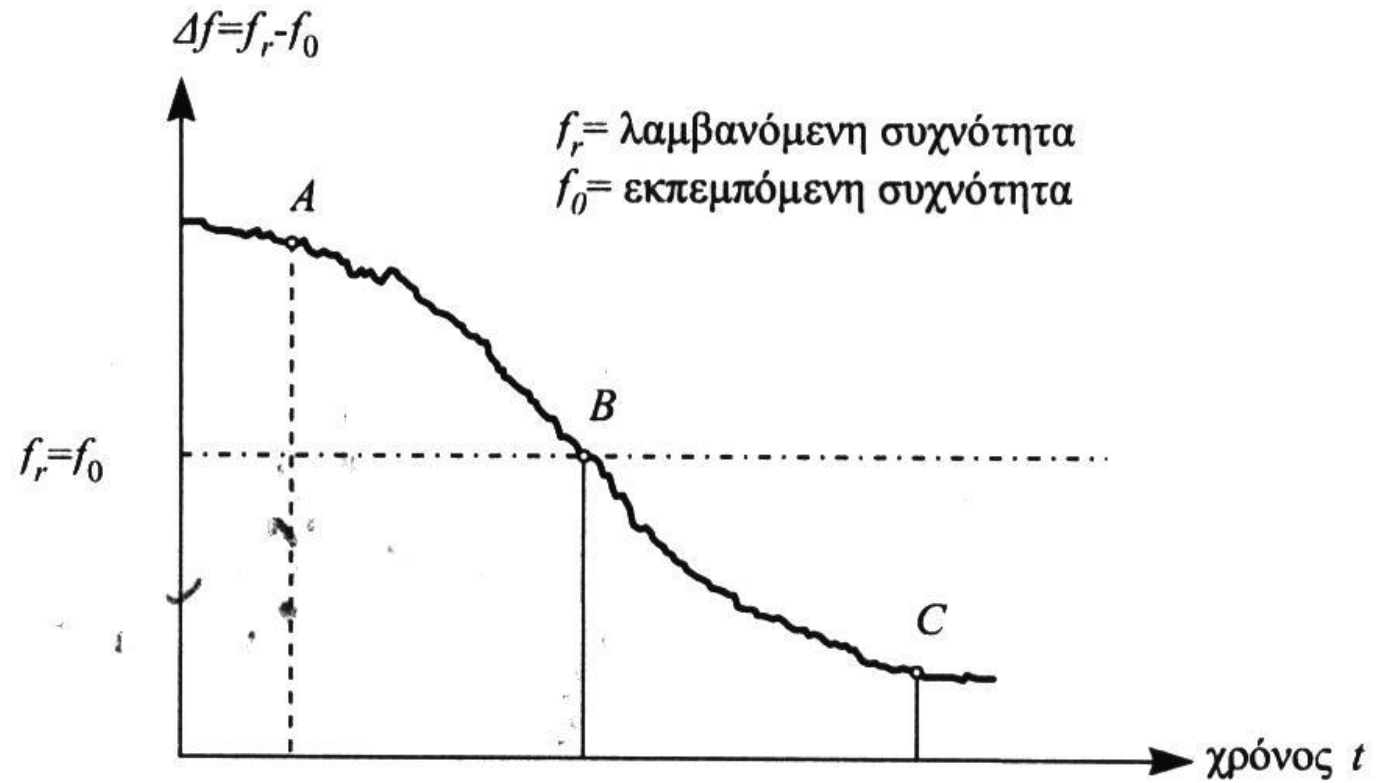
Άρα, στόχοι που απέχουν $S = 8 \text{ km}$ από την κεραία θα πρέπει να απέχουν τουλάχιστον $9,8 \text{ m}$ για να είναι δυνατόν να διαχωριστούν στην εικόνα του Radar.



Σχήμα 6.13 Τα διάφορα μέρη του Radar πραγματικού ανοίγματος κεραίας.



Σχήμα 6.14 Τα Radar συνθετικού ανοίγματος κεραίας και η διαδικασία σύνθεσης της μεγάλης κεραίας με τη μετατόπιση της συχνότητας κατά Doppler.



Σχήμα 6.15 Η διαδικασία μετατόπισης της συχνότητας κατά Doppler.

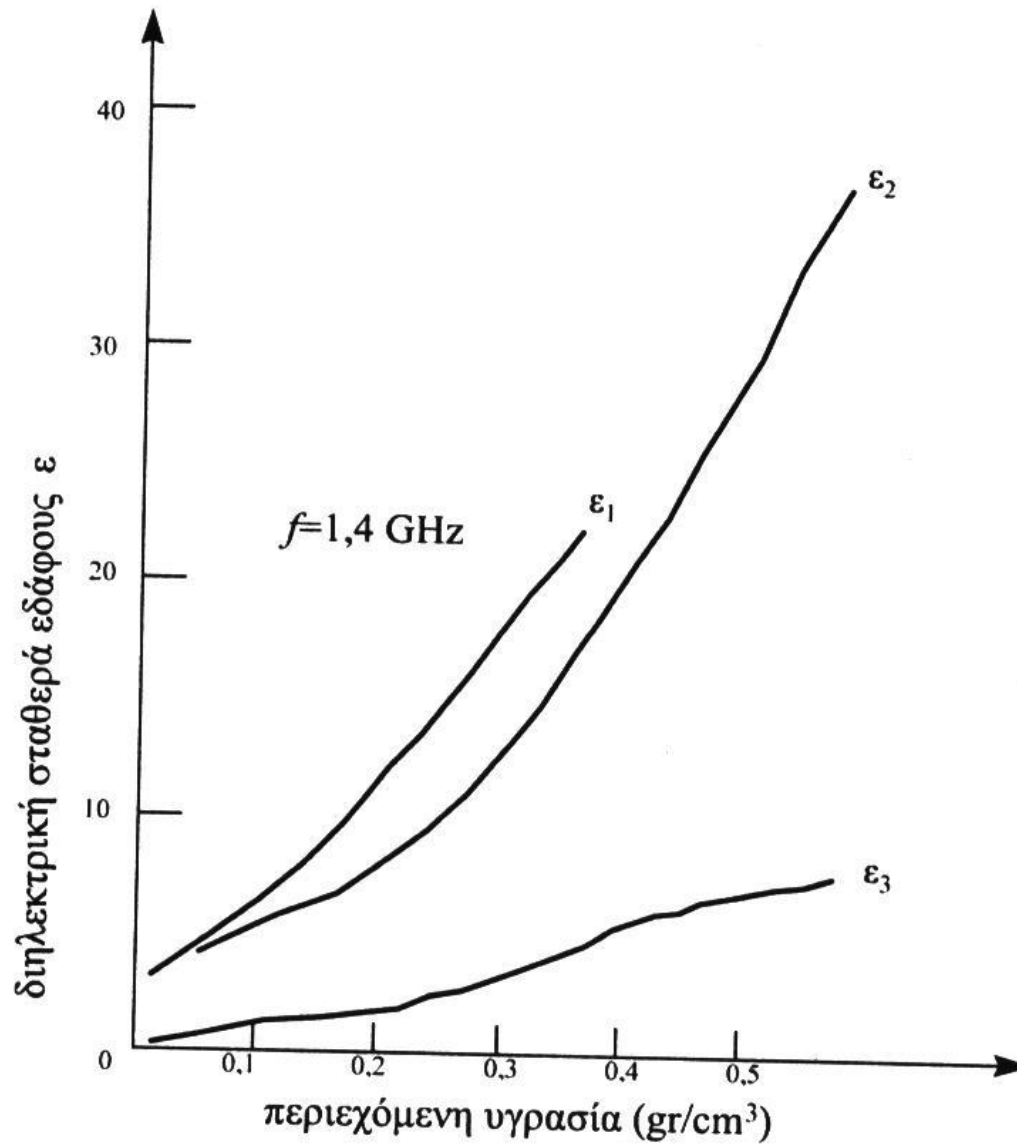
$$\beta_r = \frac{\lambda}{D} \quad [\text{rad}] \quad (6.18)$$

που στην απόσταση S του στόχου δίνει μία διάσταση κατά το αζιμούθιο L_a ίση με:

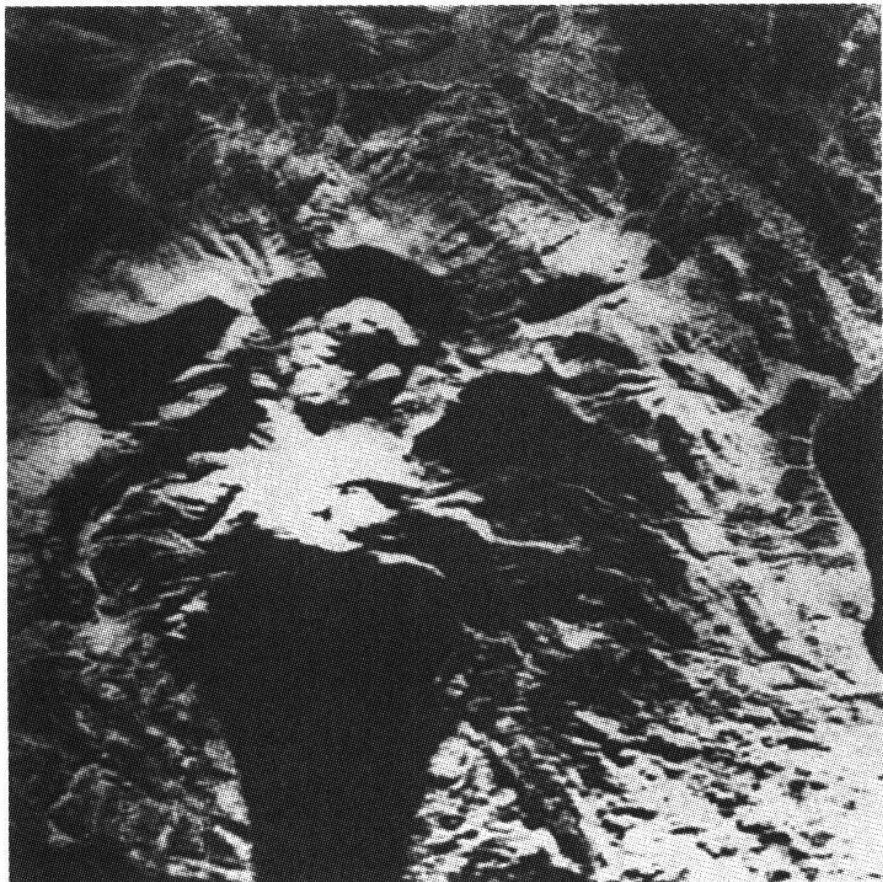
$$L_a = S \beta_r = S \frac{\lambda}{D} \quad (6.19)$$

Αυτό είναι και το μήκος του συνθετικού ανοίγματος της κεραίας SAR. Η θεωρητική τιμή της διαχωριστικής ικανότητας (χωρικής ανάλυσης) στο αζιμούθιο R_a του SAR είναι ίση με το μισό του πραγματικού μήκους της κεραίας:

$$R_a = \frac{D}{2} \quad (6.20)$$



Σχήμα 6.17 Ο ρόλος της περιεχόμενης υγρασίας στη διηλεκτρική σταθερά (πηγή Ulaby et al., 1983).

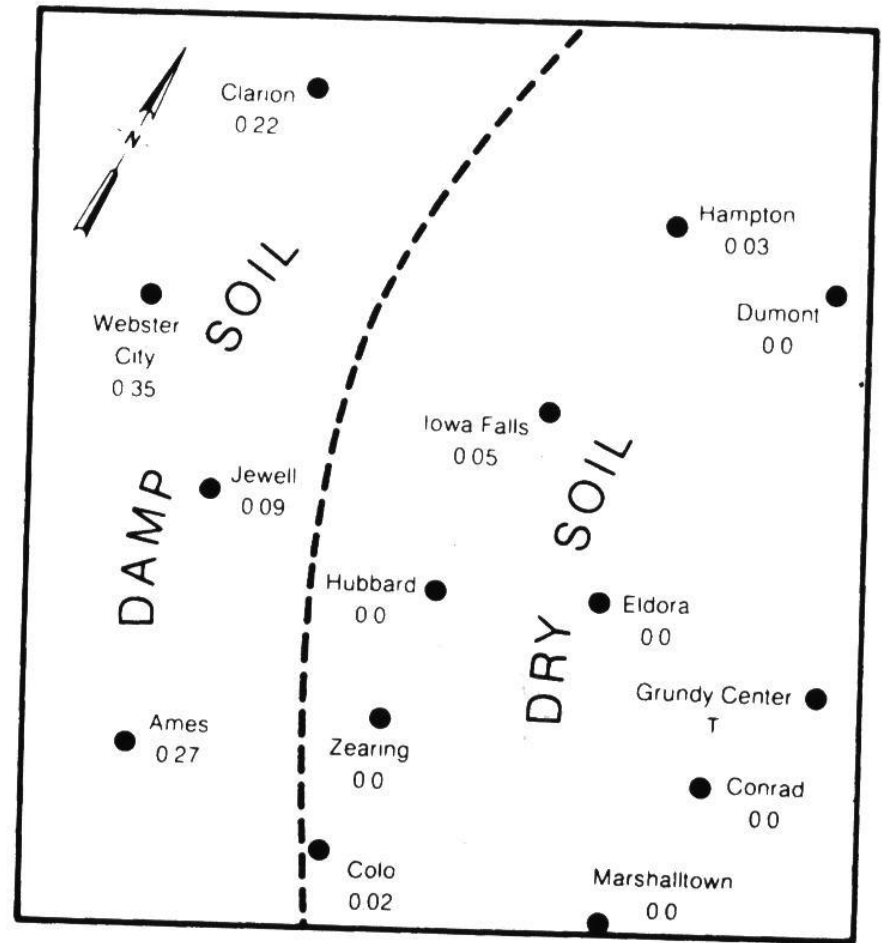
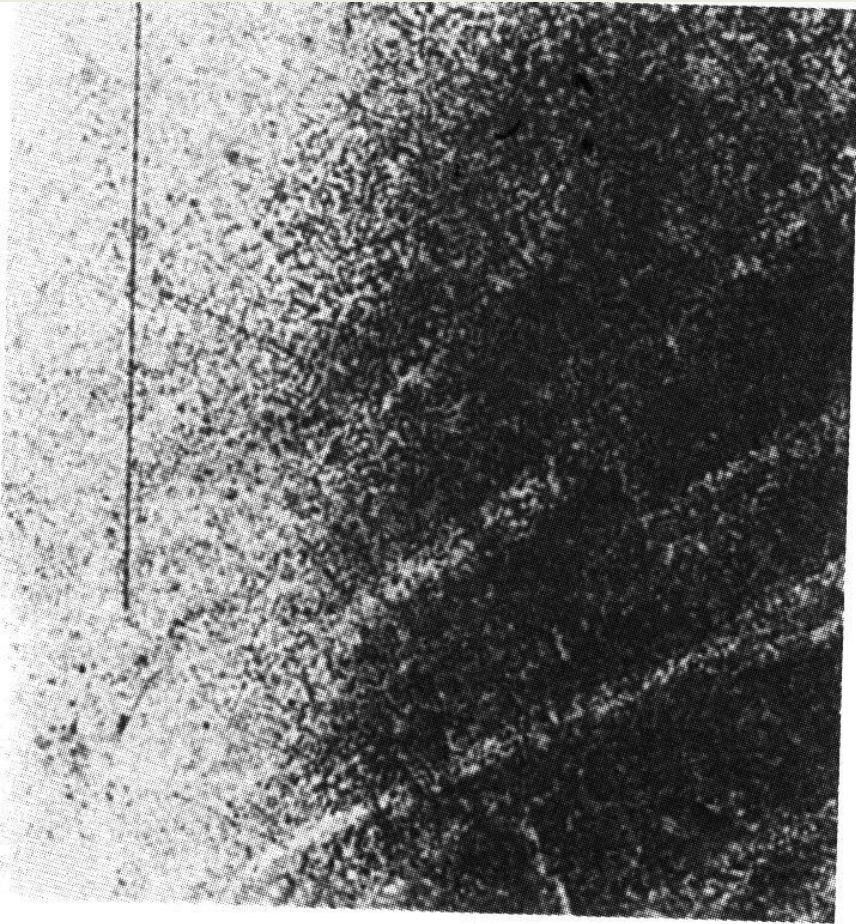


REAL-APERTURE IMAGE



SYNTHETIC-APERTURE IMAGE

Σχήμα 6.16 Εικόνες RAR και SAR για την ίδια περιοχή. Η καλύτερη διαχωριστική ικανότητα της εικόνας SAR σε όλο το εύρος της εικόνας είναι προφανής.

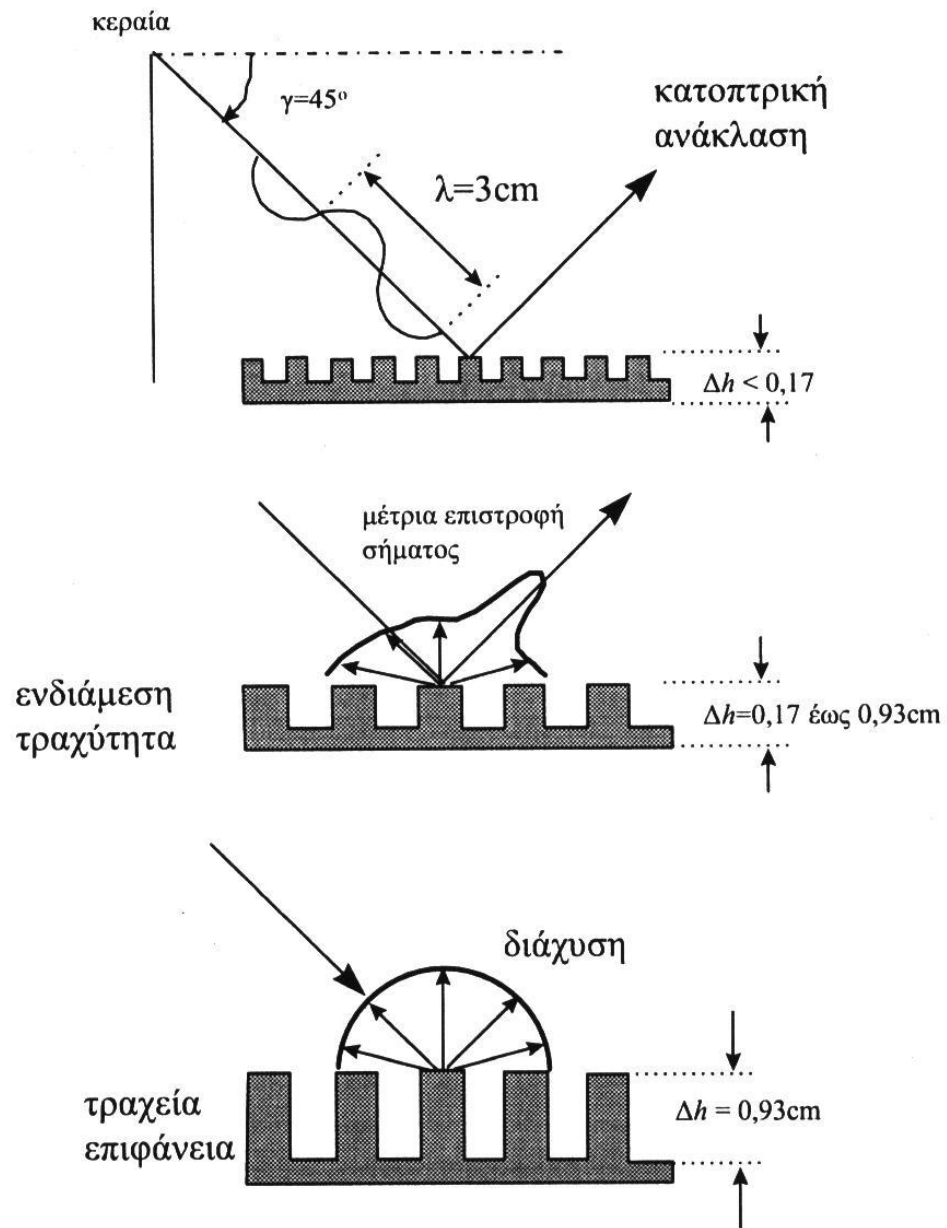


Σχήμα 6.18 Η αριστερή εικόνα είναι εικόνα Radar του SEASAT και το δεξί διάγραμμα η κατανομή των μετρήσεων των βροχοπτώσεων σε περιοχή των ΗΠΑ (1978) 12 ώρες μετά τη βροχόπτωση (πηγή Ulaby et al., 1983).

Κριτήριο Rayleigh για λεία επιφάνεια

$$\Delta h < \frac{\lambda}{8 \sin \theta} \quad (6.21)$$

$\theta = 90 - \gamma \rightarrow$ γωνία πρόσπτωσης



Σχήμα 6.19 Ο ορισμός της τραχύτητας μιας επιφάνειας.

Παράδειγμα

Για μήκος κύματος $\lambda = 3 \text{ cm}$ (X-band), και γωνία πρόσπτωσης ίση με τη γωνία πρόσπτωσης $\theta = 45^\circ$, το ύψος των επιφανειακών ανωμαλιών Δh για να θεωρηθεί η επιφάνεια λεία θα πρέπει να είναι μικρότερο από:

$$\Delta h < \frac{\lambda}{8 \sin \theta} = \frac{3 \text{ cm}}{8 \sin(45^\circ)} = 0,53 \text{ cm} \quad (6.22)$$

Αυτό σημαίνει ότι ένα κατακόρυφο ανάγλυφο των $0,53 \text{ cm}$ είναι το θεωρητικό όριο μεταξύ λείας και τραχείας επιφάνειας.

Το κριτήριο Rayleigh προσαπομάθησε ανώτερο ώστε να ορίσει την ανώτατη και

$$\Delta h < \frac{\lambda}{25 \sin \theta} \quad (6.23)$$

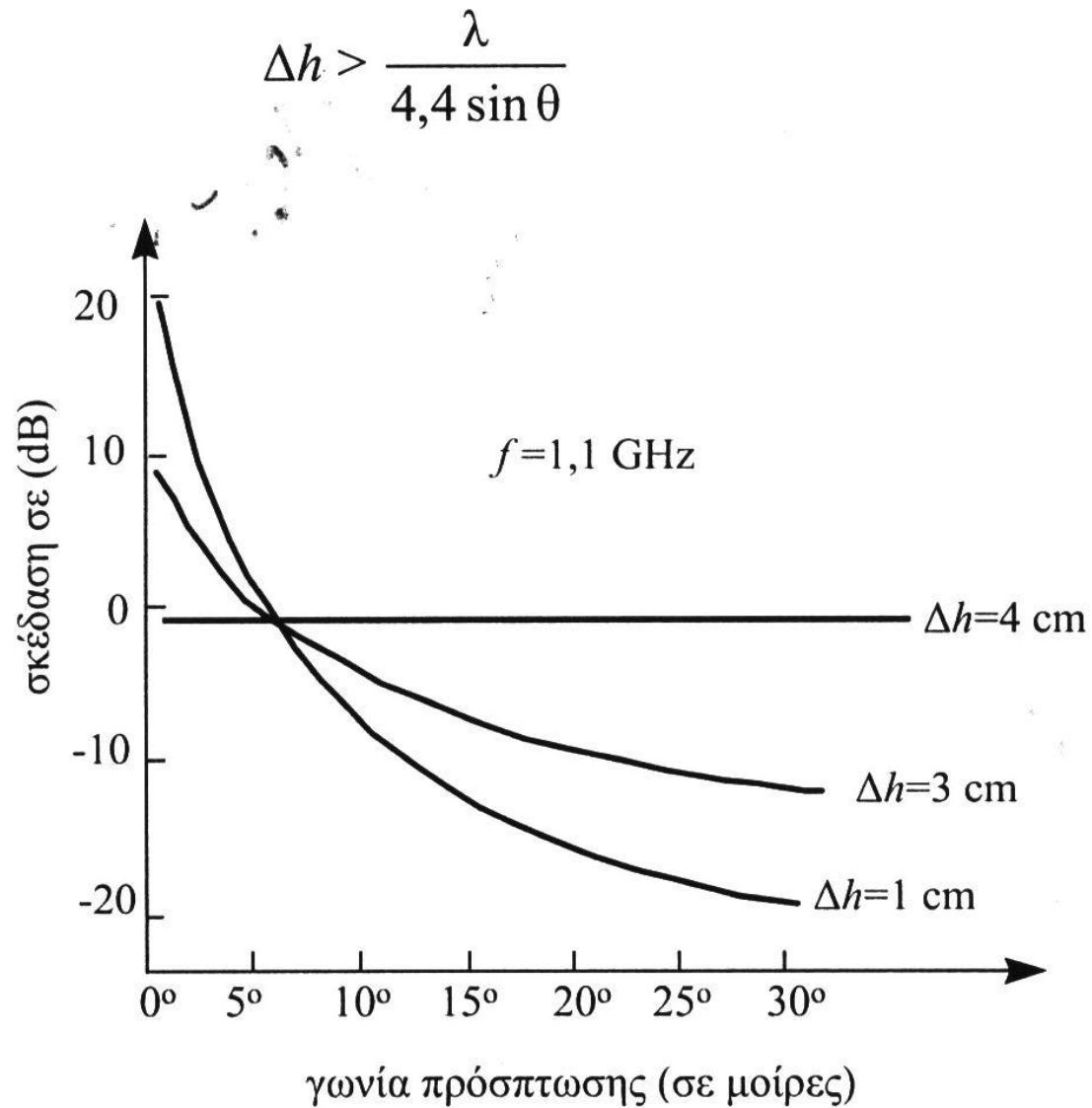
Παράδειγμα

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του προηγούμενου παραδείγματος, βρίσκουμε ότι το όριο του ύψους των επιφανειακών ανωμαλιών μιας επιφάνειας που θεωρείται λεία είναι:

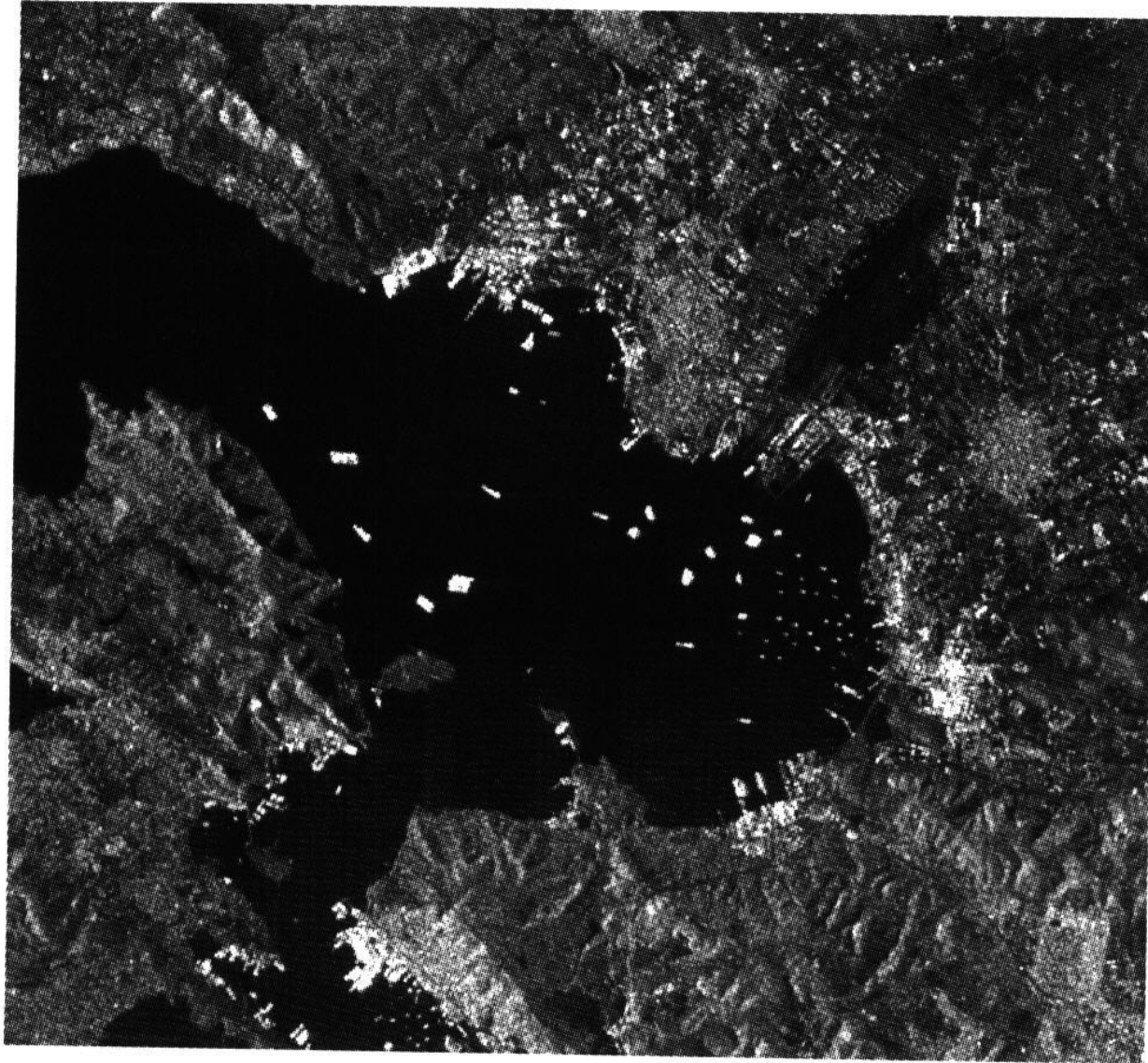
$$\Delta h < \frac{\lambda}{25 \sin \theta} = \frac{3 \text{ cm}}{25 \sin(45^\circ)} = 0,17 \text{ cm} \quad (6.24)$$

Αυτό σημαίνει ότι το κατακόρυφο ανάγλυφο των 0,17 cm είναι το όριο μεταξύ λείων επιφανειών και επιφανειών ενδιάμεσης τραχύτητας.

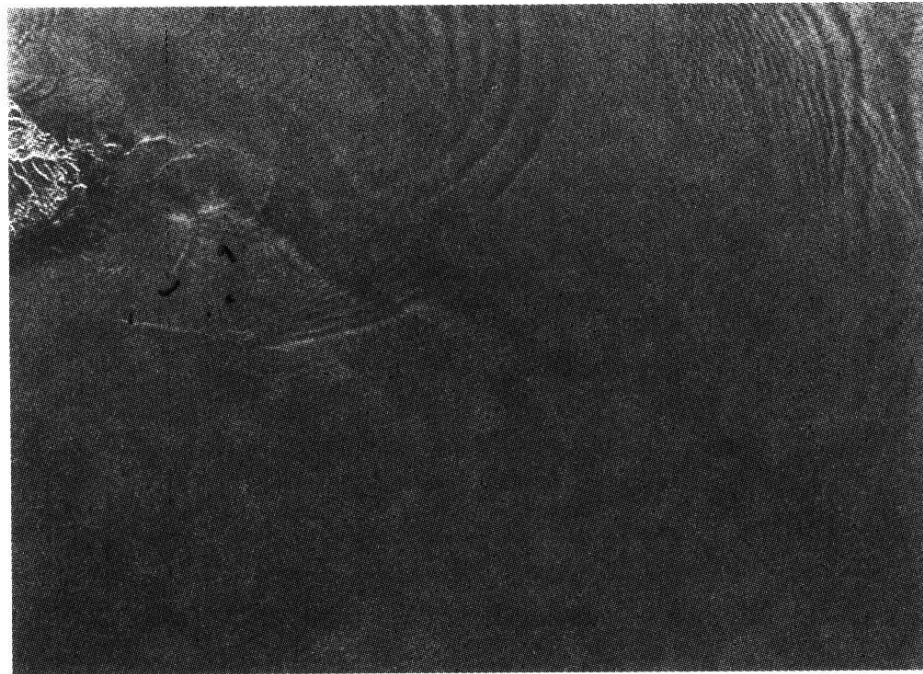
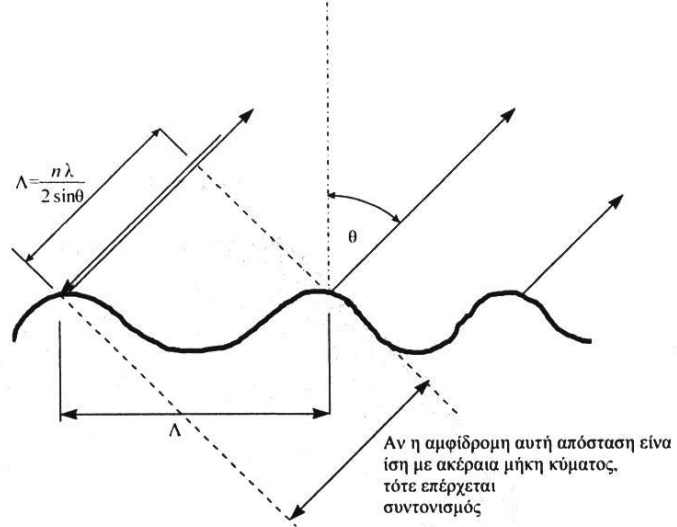
Μια επιφάνεια θεωρείται **τραχεία**, αν το ύψος των επιφανειακών ανωμαλιών της είναι μεγαλύτερο από το:



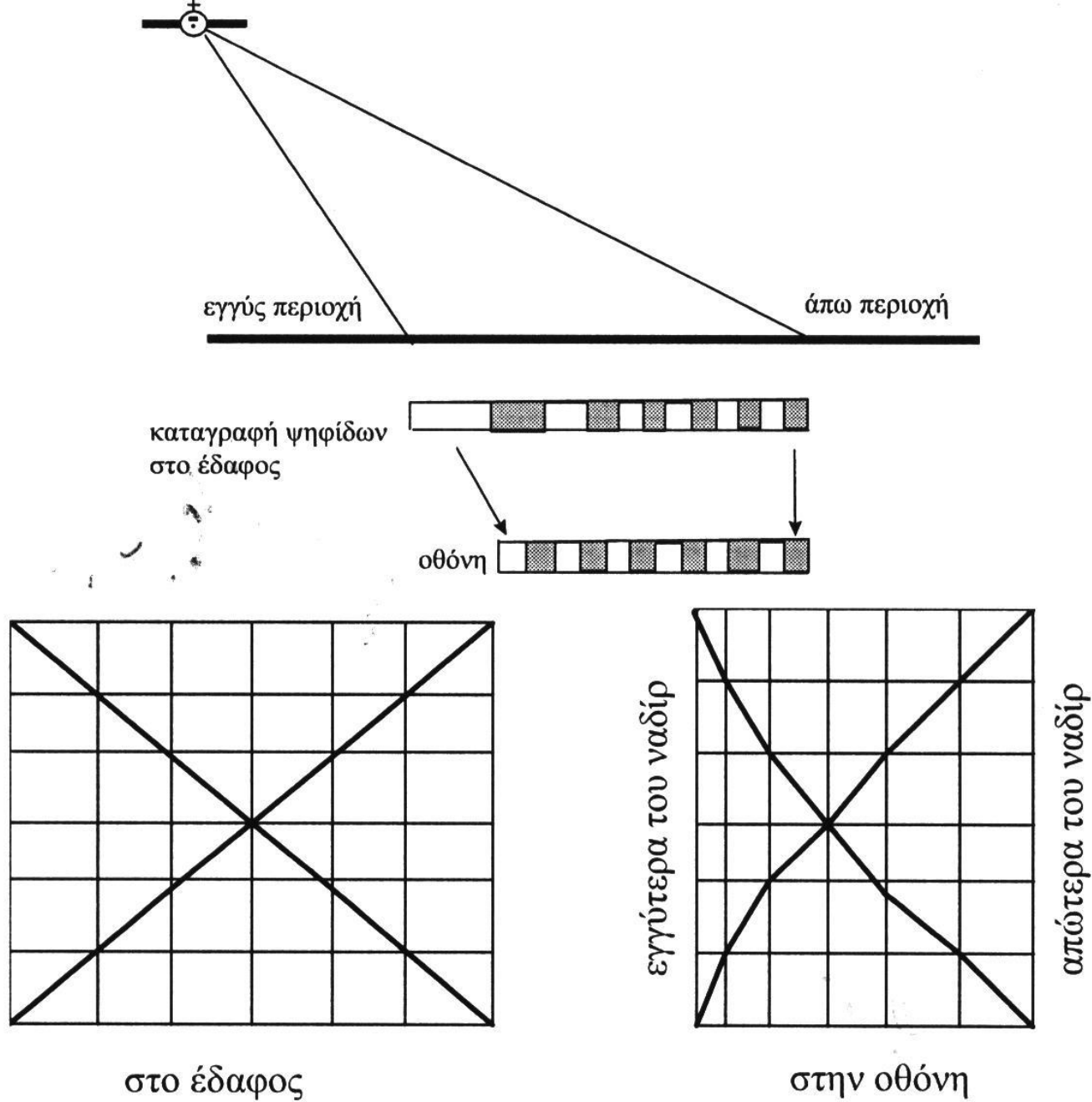
Σχήμα 6.20 Σχέση του συντελεστή σκέδασης με τη γωνία πρόσπτωσης και την τραχύτητα της επιφάνειας.



Σχήμα 6.21 Εικόνα από το SIR-C/X-SAR στην L-band (2 Οκτωβρίου 1994) από τον Πειραιά και τη Σαλαμίνα, όπου τα καράβια στον κόλπο λόγω συντονισμού και γωνιακής ανάκλασης παρουσιάζουν έντονους φωτεινούς τόνους του γκρι.

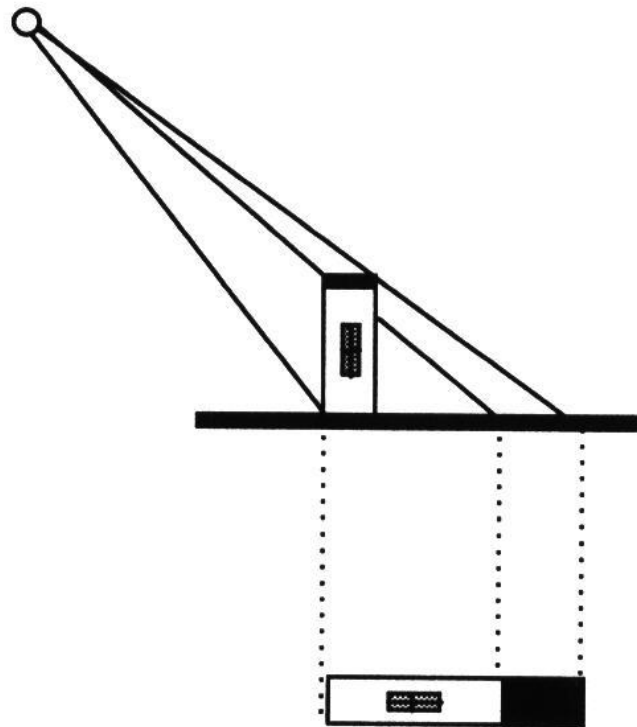


Σχήμα 6.22 Συντονισμός Bragg στην επιφάνεια της θάλασσας. Η δεύτερη κάτω εικόνα αποκαλύπτει διαφορετικούς κυματισμούς, παρόλο που η επιφάνεια της θάλασσας είχε ομοιόμορφη κατανομή των σκεδαστών



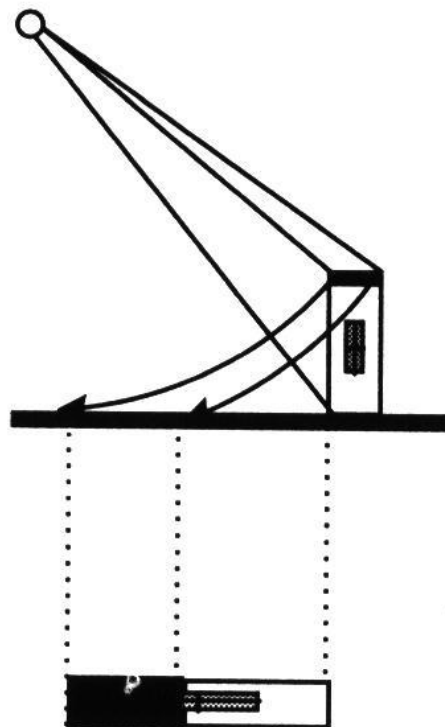
Σχήμα 6.23 Γεωμετρική παραμόρφωση εικόνων στα Radar.

φωτομηχανή



το ανάγλυφο
απομακρύνεται
από το ναδίρ

κεραία Radar

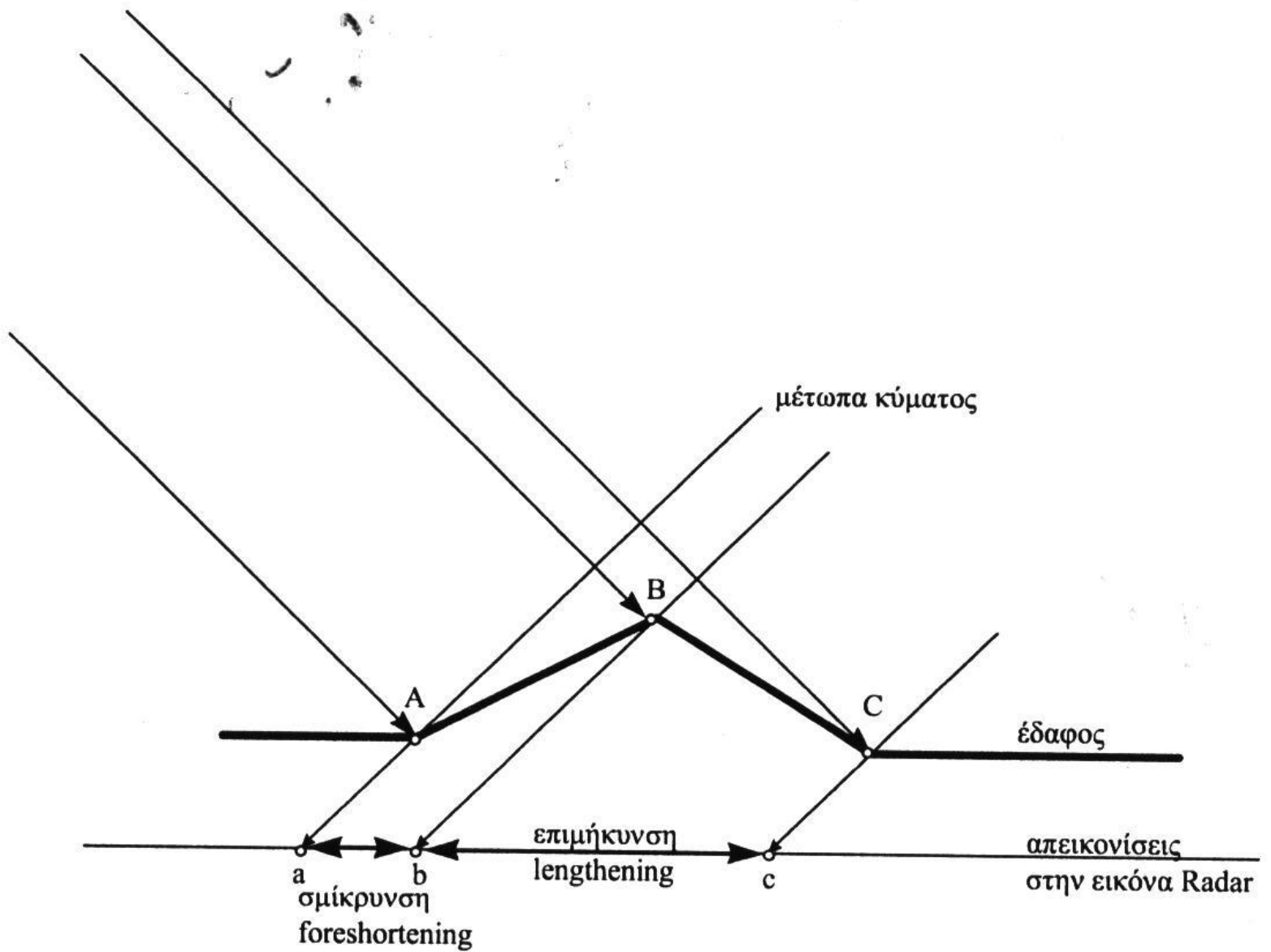


το ανάγλυφο
προσεγγίζει
το ναδίρ

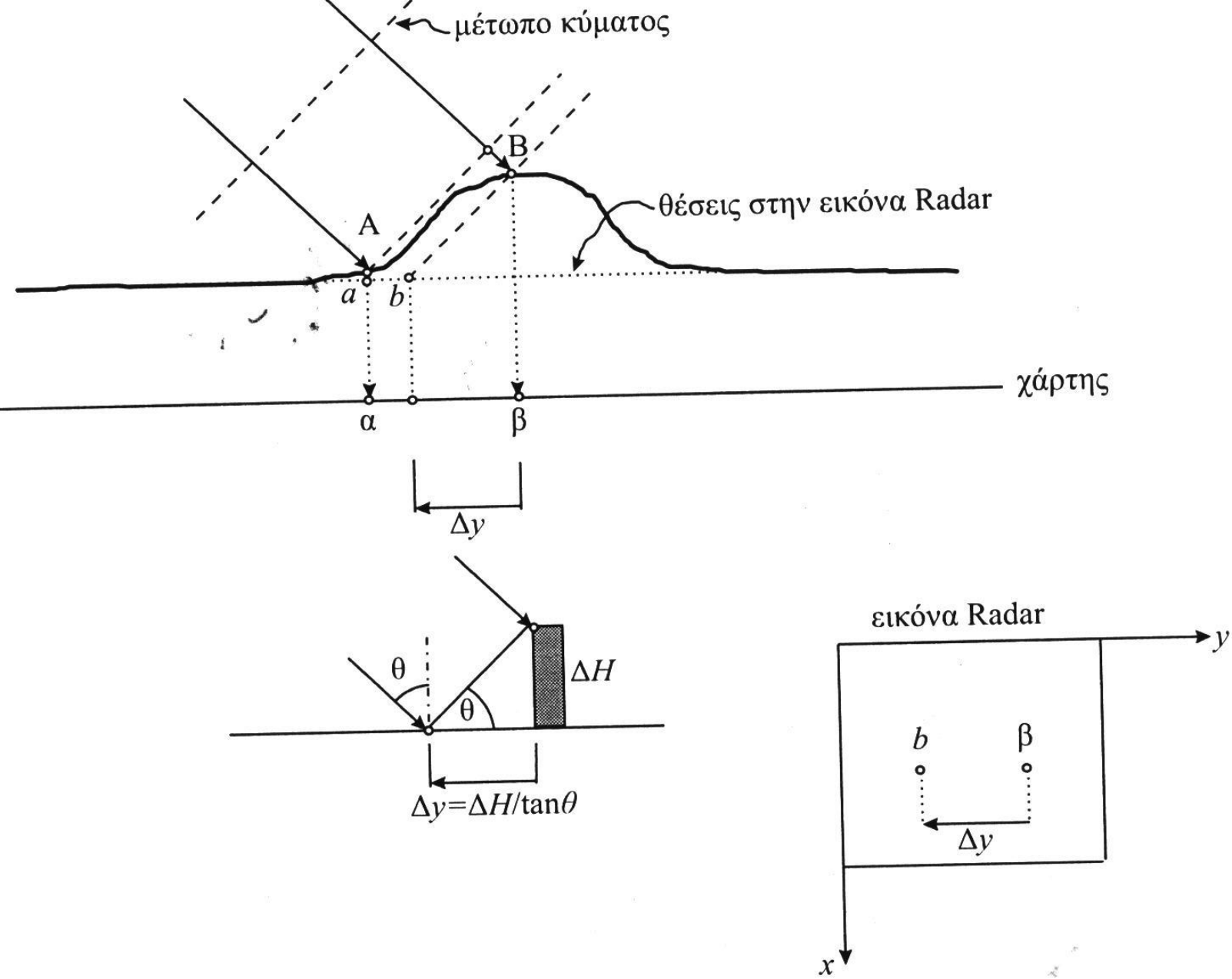
πραγματικότητα

εικόνα

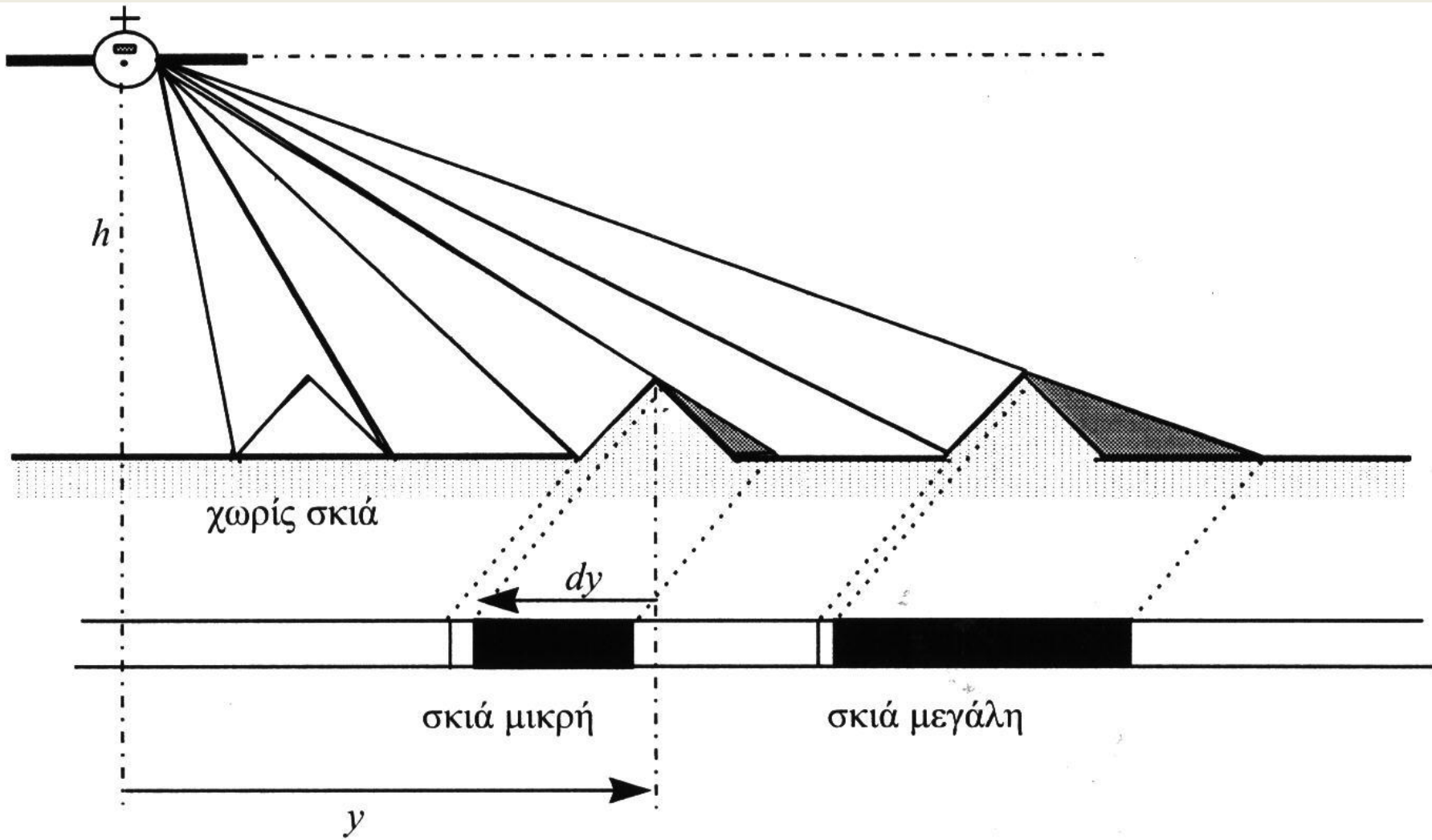
Σχήμα 6.24 Γεωμετρική αναστροφή (layover) κατακόρυφων στόχων στις εικόνες Radar.



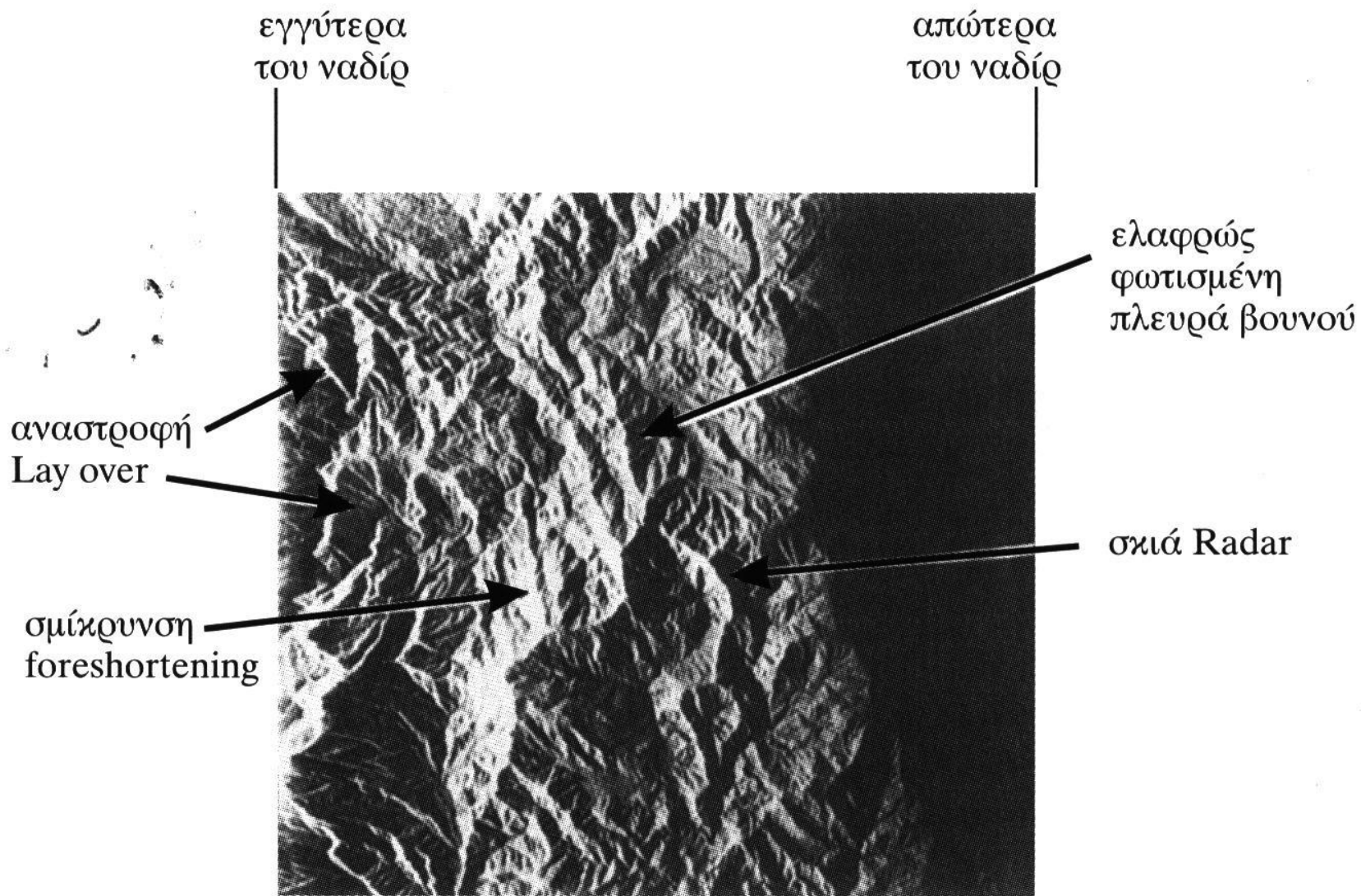
Σχήμα 6.25 Γεωμετρικές παραμορφώσεις της σμίκρυνσης και της επιμήκυνσης στις εικόνες Radar.



Σχήμα 6.26 Γεωμετρικές παραμορφώσεις στις εικόνες Radar.



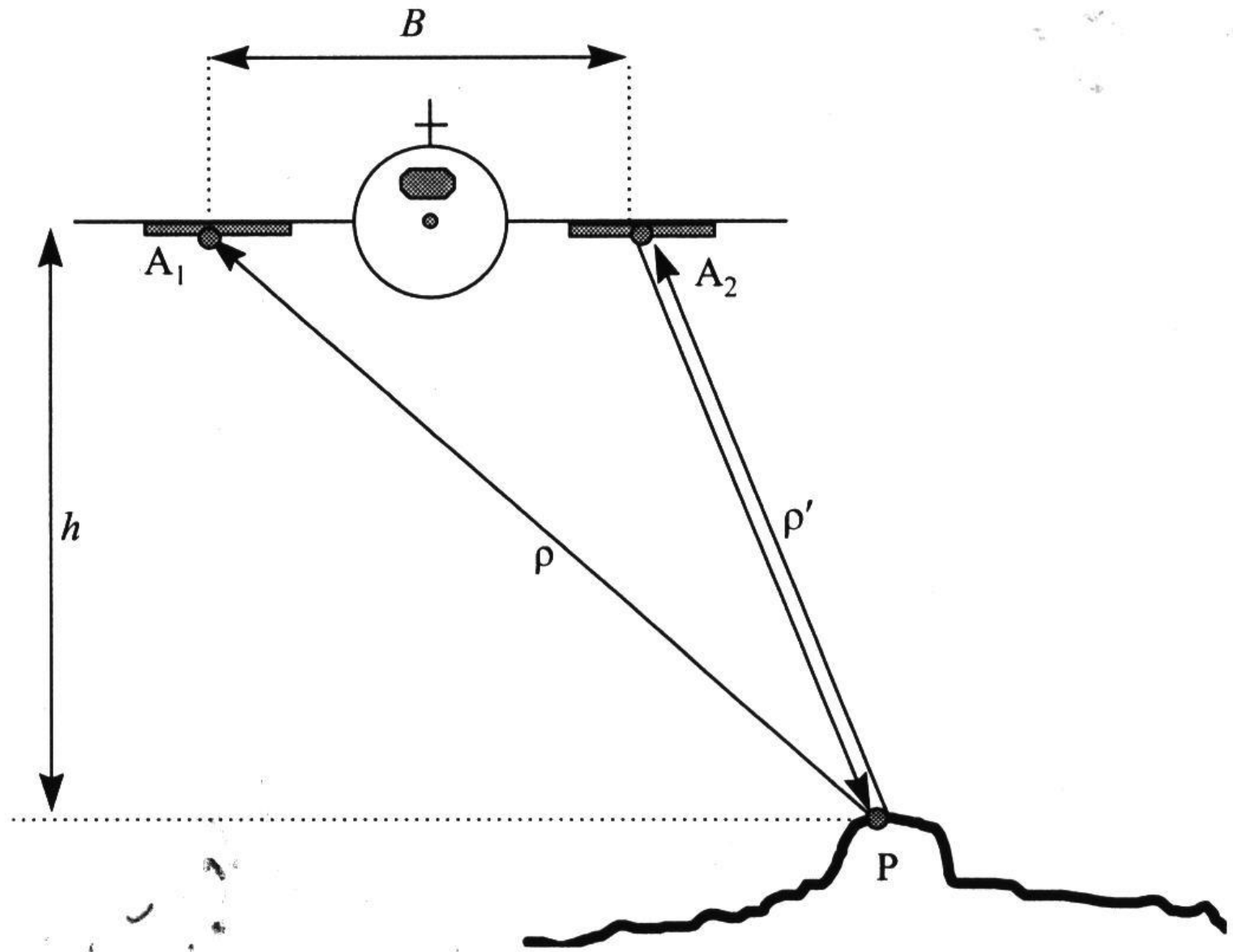
Σχήμα 6.27 Σκιές στις εικόνες Radar.



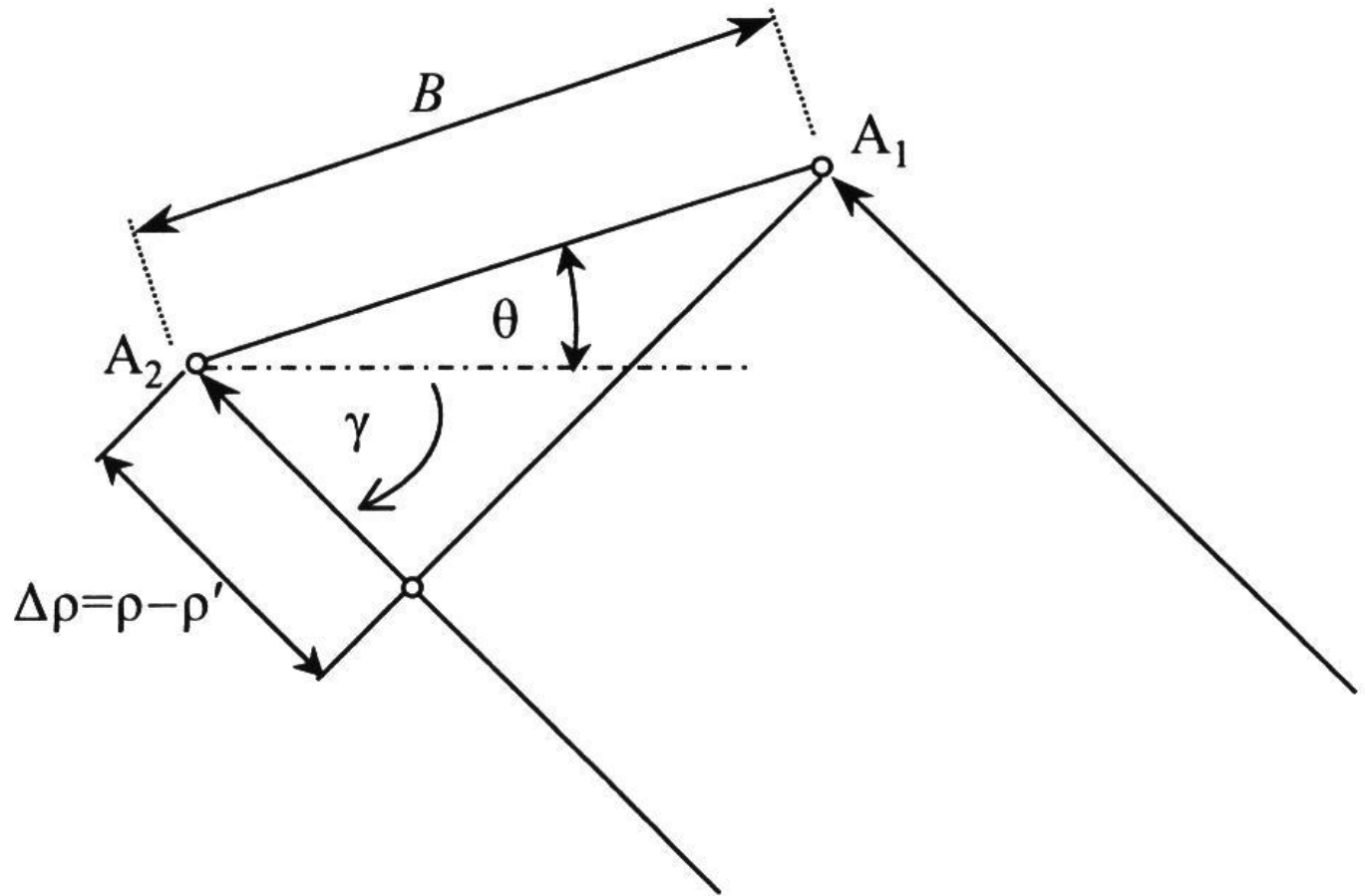
Σχήμα 6.28 Χαρακτηριστικά στις εικόνες Radar.



Σχήμα 6.29 Στίγματα (speckles) στις εικόνες Radar (πηγή Leberl, 1990).



Σχήμα 6.30 Η γεωμετρία του συμβολομέτρου του Radar.



Σχήμα 6.31 Η λεπτομέρεια στη γεωμετρία του συμβολομέτρου Radar.

Η διαφορά αποστάσεων $\Delta\rho = \rho - \rho'$ συνδέεται με τη βάση των κεραιών B και τις γωνίες κλίσης θ και βάθους γ με τη σχέση:

$$\Delta\rho = \rho - \rho' = B \cos(\theta + \gamma) \quad (6.31)$$

Η διαφορά φάσης $\Delta\varphi$ μεταξύ των δύο σημάτων επιστροφής μπορεί να εκφραστεί σε ακτίνια (rad) και να γραφεί ως:

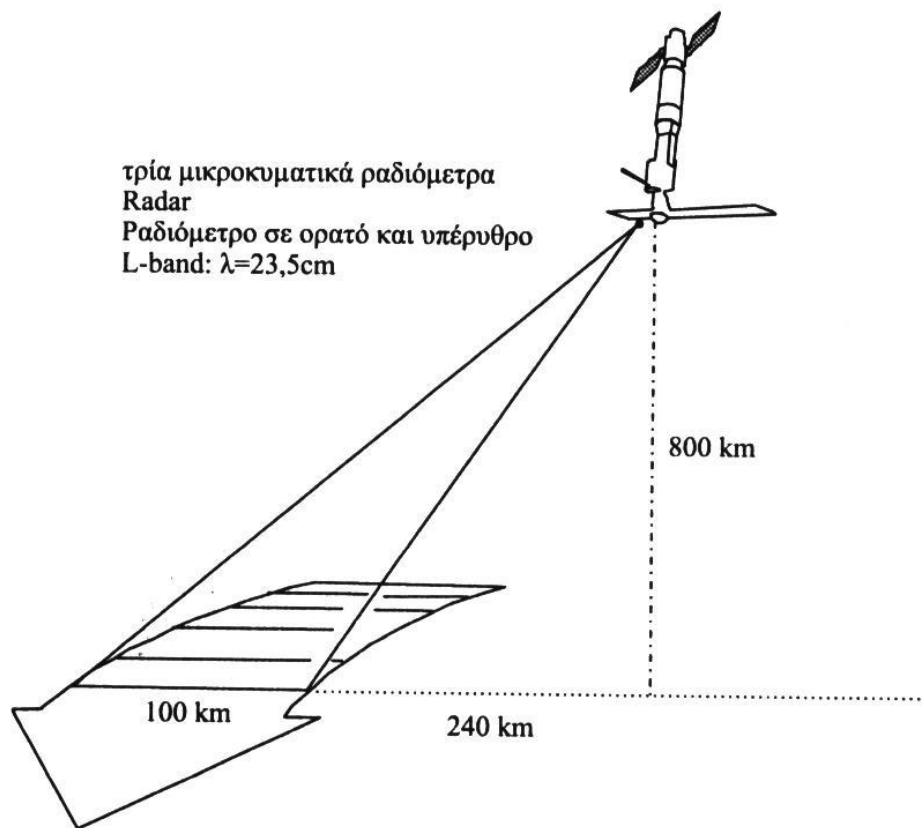
$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \Delta\rho \frac{2\pi}{\lambda} \quad (6.32)$$

όπου λ είναι το μήκος κύματος του Radar. Επομένως το ύψος πτήσης του αεροσκάφους πάνω από το σημείο P εκφράζεται ως εξής:

$$h = \rho \sin \gamma = \rho \sin[\cos^{-1}(\frac{\Delta\varphi\lambda}{2\pi B}) - \theta] \quad (6.33)$$

6.9.1 SEASAT

Ο SEASAT ήταν δορυφόρος (Σχήμα 6.32) κατασκευασμένος ειδικά για παρατηρήσεις των ωκεανών μεταφέροντας όργανα για την καταγραφή της ταχύτητας των ανέμων, των κυμάτων, της θερμοκρασίας και της τοπογραφίας.



Σχήμα 6.32 Ο δορυφόρος Seasat και η λωρίδα κάλυψής του.

6.9.2 Τα συστήματα SIR

Τα δορυφορικά προγράμματα SIR-A και SIR-B (Shuttle Imaging Radar) ήταν πειραματικά προγράμματα της αμερικανικής NASA που χρησιμοποιούσαν το διαστημόπλοιο Shuttle, σε ανάστροφη θέση, σε ύψος πτήσης περίπου $h = 250$ km και με κλίση $i = 57^\circ$ στην τροχιά του. Το σύστημα SIR-B είχε διαχωριστική ικανότητα στην απόσταση $R_r = 5,8$ m–17 m και χωρική ανάλυση στο αζιμούθιο $R_a = 25$ m. Το μήκος κύματος ήταν $\lambda = 23,5$ cm σε πόλωση HH, ενώ οι λωρίδες κάλυψης εκυμαίνοντο από 30–60 km. Τέλος υπάρχει και το σύστημα SIR-C/X-SAR με τρεις διαφορετικές κεραίες: μία στην L-band ($\lambda = 23,5$ cm), μία στη C-band ($\lambda = 5,8$ cm), και η τρίτη στην X-band ($\lambda = 3$ cm) με χωρική ανάλυση 30 m \times 30 m.

Χαρακτηριστικά	SIR-A	SIR-B	SIR-C	X-SAR
Χρονολογία	1981	1984	1993, 94	1993,94
Συχνότητα– Πόλωση	L-HH	L-HH	L-HH, HV, VV	L-VV
Γωνία πρόσπτωσης	50°	15–60°	15–60°	15–60°
Az/ R ανάλυση	4,7&33 m	5,4&14,4 m	6,1&8,7 m	6,1&8,7 m
Πλάτος λωρίδας	50 km	15–50 km	30–100 km	10–45 km

Πίνακας 6.2 Συγκριτικός πίνακας τεχνικών χαρακτηριστικών των δορυφόρων της σειράς SIR.

6.9.3 Το ευρωπαϊκό σύστημα ERS

Η Ευρωπαϊκή Εταιρεία Διαστήματος (European Space Agency) έθεσε σε τροχιά τον δορυφόρο Τηλεπισκόπησης ERS-1 (European Remote Sensing Satellite) τον Ιούλιο του 1991 με στόχο την παρατήρηση των περιβαλλοντικών προβλημάτων. Ο δορυφόρος βρίσκεται σε τροχιά ύψους $h = 780$ km και κινείται με ταχύτητα 7 km/s, κάνοντας μία πλήρη περιστροφή της γης σε $T = 100$ min. Η τροχιά του είναι σχεδόν κυκλική, ηλιοσύγχρονη με κλίση $i = 98^\circ$ ως προς τον ισημερινό. Διαθέτει σύστημα SAR με μήκος κύματος $\lambda = 5,6$ cm και καταγράφει επιφάνειες της γης με επαναληπτικότητα 35 ημερών. Καλύπτει λωρίδες της γης πλάτους 100 km με διαχωριστική ικανότητα 2 m \times 2 m. Το SAR λειτουργεί μόνο για δέκα λεπτά της ώρας σε κάθε περιστροφή και πάνω από περιοχές όπου υπάρχει επίγειος σταθμός λήψης δεδομένων. Τα δεδομένα του ERS-1 SAR χρησιμοποιούνται για ανίχνευση πετρελαιοκηλίδων, για ανίχνευση πλοίων, για την παρατήρηση της χλωρίδας κλπ. Σήμερα λειτουργεί ο δορυφόρος ERS-2 και θα ακολουθήσει ο ENVISAT (έτος 2000).

6.9.4 Το σύστημα Radarsat

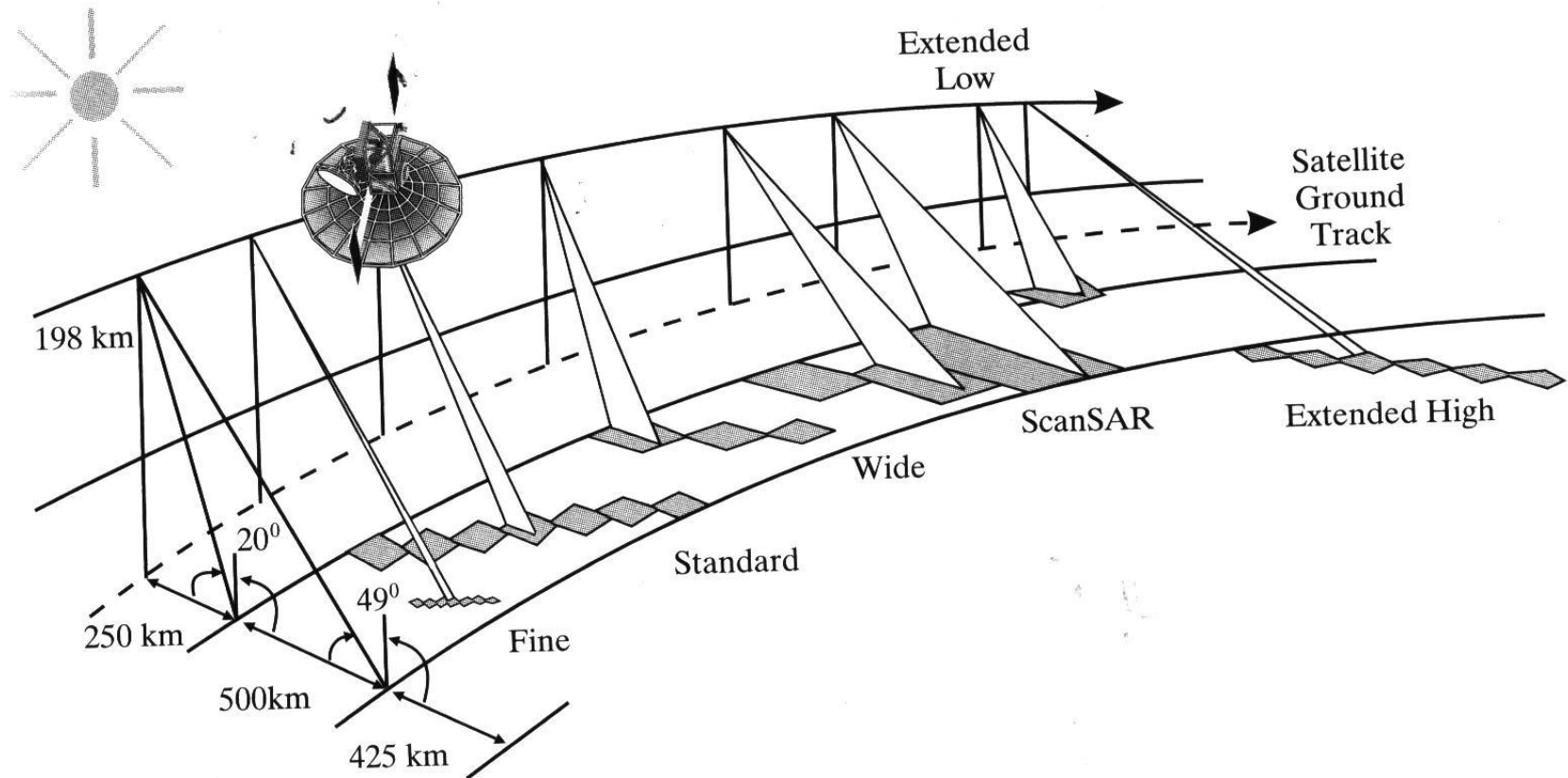
Το σύστημα Radarsat της καναδέζικης Εταιρείας Διαστήματος λειτουργεί στη C-band ($\lambda = 5,6$ cm, $\nu = 5,3$ GHz) με πολικότητα HH, έχει την δυνατότητα στερεοσκοπικής κάλυψης, και διαθέτει επαναληπτικότητα λήψης κάθε 24 ημέρες (αν και λόγω των διαφορετικών γωνιών παρατήρησης η επαναληπτικότητα φτάνει και την 1 με 5 ημέρες). Ο δέκτης έχει 7 διαφορετικούς τρόπους κάλυψης και χωρικών αναλύσεων, όπως φαίνονται στον Πίνακα 6.3.

Όνομασία	Εδαφική κάλυψη	Χωρική ανάλυση
Fine	50 × 50 km	10 m
Extended High	75 × 75 km	25 m
Standard	100 × 100 km	30 m
Wide	150 × 150 km	30 m
Extended Low	170 × 170 km	35 m
ScanSAR Narrow	300 × 300 km	50 m
ScanSAR Wide	500 × 500 km	100 m

Πίνακας 6.3 Οι περιοχές κάλυψης εδάφους και οι αντίστοιχες χωρικές αναλύσεις στον Radarsat.

Ο Πίνακας 6.4 συγκρίνει μερικά τεχνικά χαρακτηριστικά των δορυφόρων Radarsat, ERS και JERS.

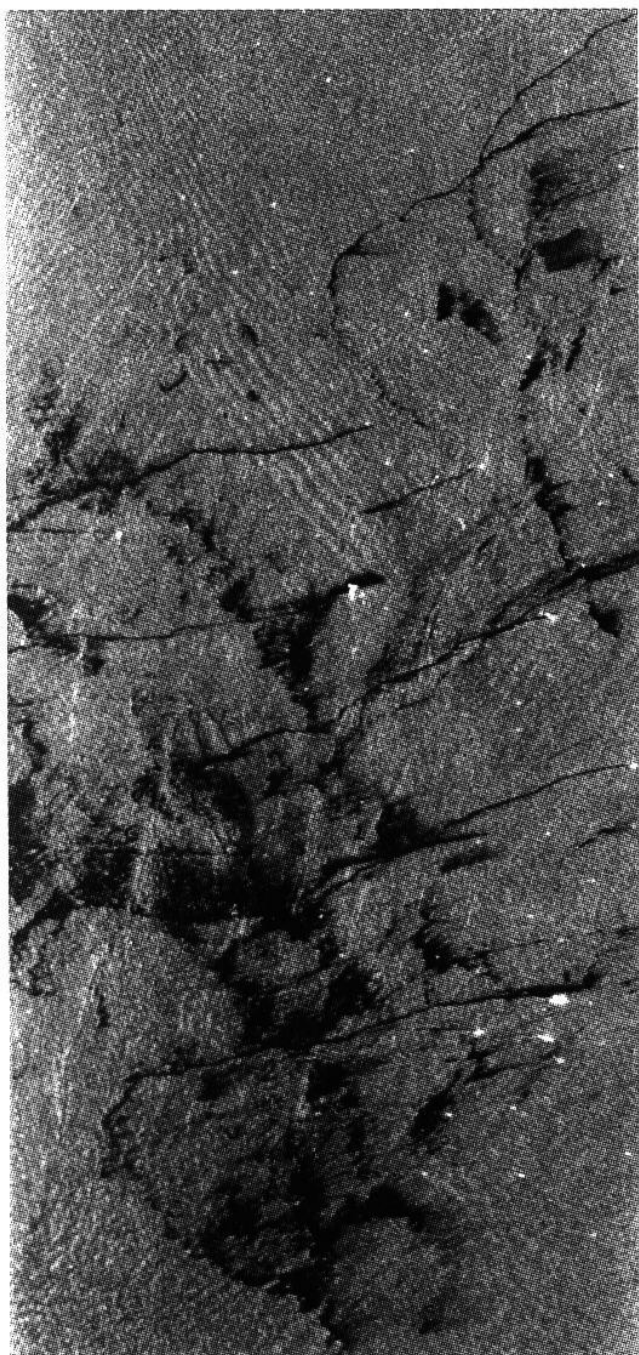
Πέραν των δορυφορικών συστημάτων, εταιρείες και οργανισμοί πολλών χωρών έχουν αναπτύξει συστήματα SAR που μεταφέρονται από αεροσκάφη, όπως οι AIRSAR (ΗΠΑ), Intera (Καναδάς), TUD (Δανία), DLR (Γερμανία), CAS (Κίνα) και άλλες.



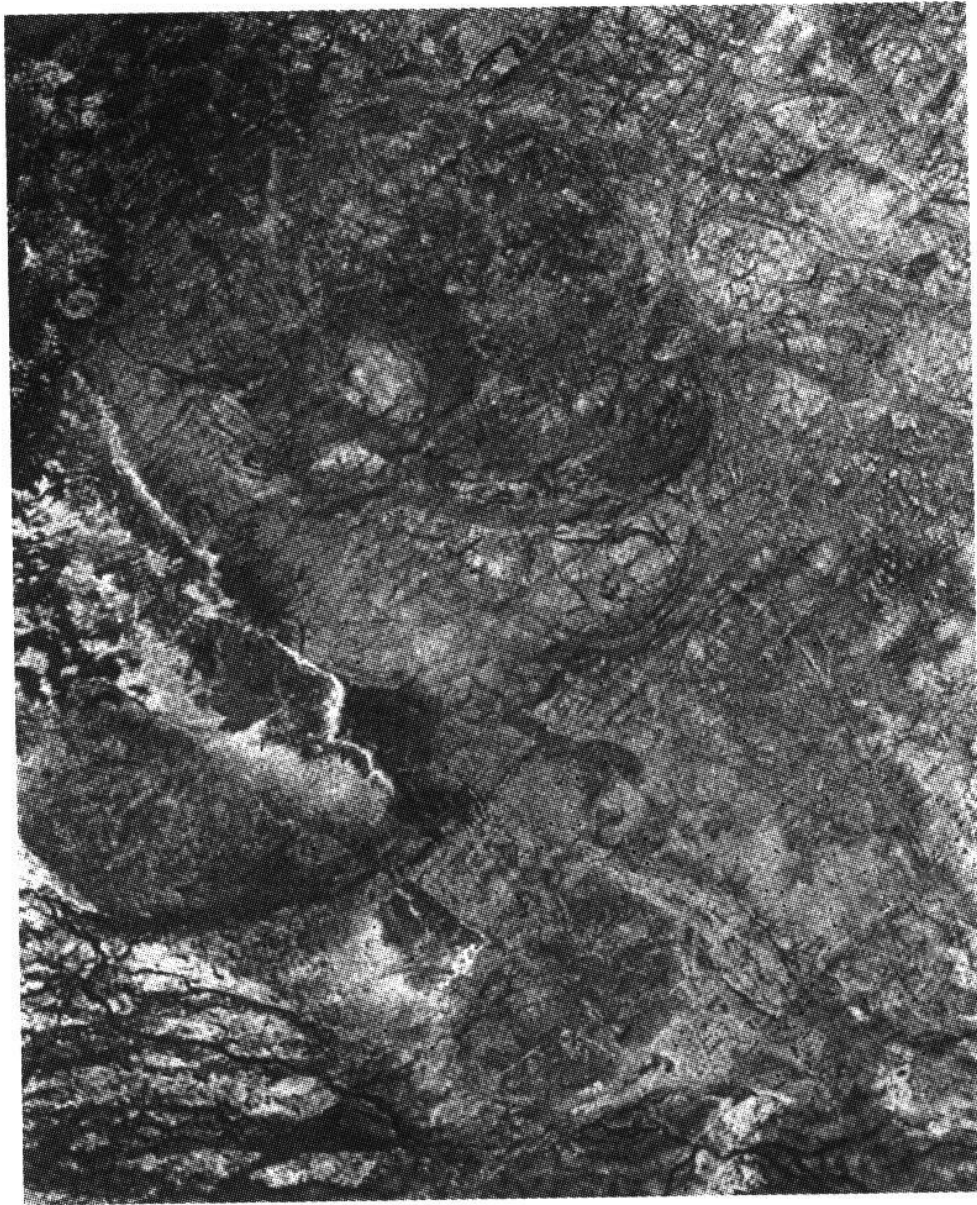
Σχήμα 6.33 Ο τρόπος κάλυψης του δορυφόρου Radarsat.

Χαρακτηριστικά	Radarsat	ERS	JERS
Κατασκευαστής	Καναδάς	Ευρώπη	Ιαπωνία
Συχνότητα– Πόλωση	C–HH	C–VV	L–HH
Εύρος γωνίας πρόσπτωσης	10–60°	20–26°	36–41°
Χωρική ανάλυση	10–100 m	100 m	18 m
Πλάτος λωρίδας	50–500 km	100 km	75 km
Επανάληψη λήψης	24 days	35 days	44 days

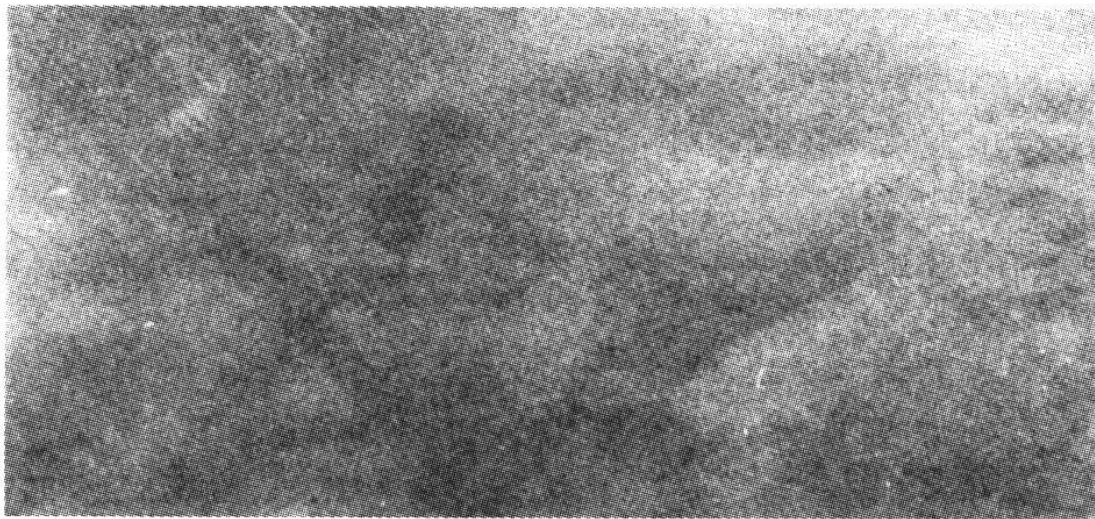
Πίνακας 6.4 Συγκριτικός πίνακας τεχνικών χαρακτηριστικών των δορυφόρων Radarsat, ERS και JERS (ιαπωνικός).



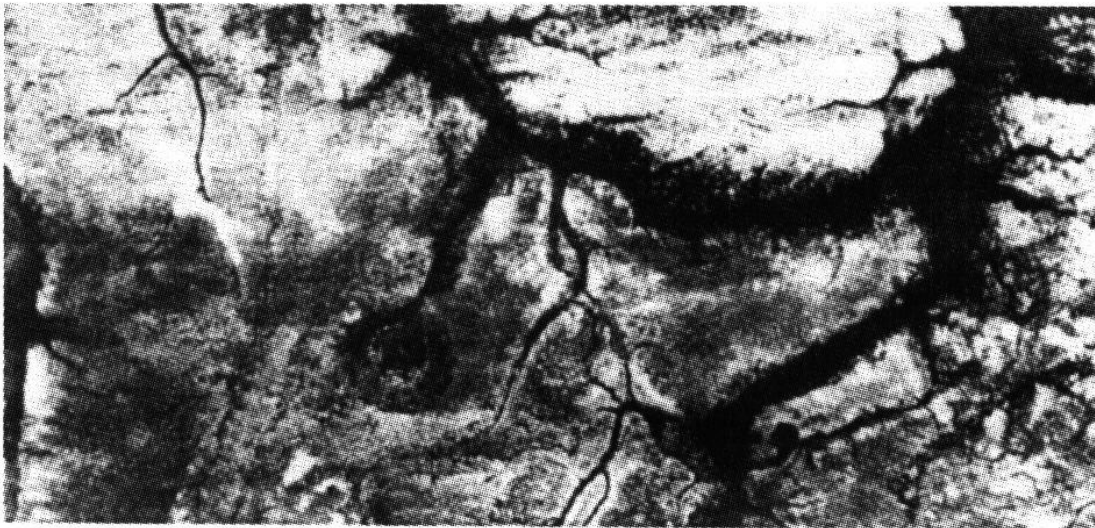
Σχήμα 6.34 Εικόνα SIR-C/X-SAR από τη Θάλασσα της Αραβίας που απεικονίζει μια έκταση $29 \text{ km} \times 45 \text{ km}$ από πετρελαιοκηλίδες και εσωτερικά κύματα καθώς και κύματα επιφανείας της θαλάσσης.



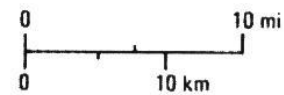
Σχήμα 6.35 Εικόνα SIR-C/X-SAR διαστάσεων 52 km × 30 km σε περιοχή στην κεντρική νότιο Αίγυπτο που αποκαλύπτει γεωλογία 2 m κάτω από την ξηρή έρημο.



A. LANDSAT MSS BAND-5 IMAGE.



B. SIR-A IMAGE.



Σχήμα 6.36 Η ικανότητα διείσδυσης των μικροκυμάτων σε περιοχές με μικρή διηλεκτρική σταθερά, όπως είναι η έρημος στο νοτιοδυτικό Σουδάν.