Κινητές επικοινωνίες

Κεφάλαιο 7

Άσκηση επανάληψης – Καθολική σχεδίαση δικτύου

Σχεδίαση συστήματος

- Η εταιρία μας θέλει να καλύψει με κυψελωτό σύστημα τηλεφωνίας μία πόλη επιφάνειας 20000 km^2 (συχνότητα 900 MHz, 124 κανάλια συχνοτήτων). Γνωρίζουμε ότι στην πόλη διαμένουν κατά μέσο όρο 60000 άνθρωποι, ομοιόμορφα κατανεμημένοι, καθώς επίσης και ότι στην ώρα αιχμής το 70% των συνδρομητών επιχειρεί κλήση. Κάθε κλήση έχει μέση διάρκεια 150 sec. Γνωρίζουμε ότι η ευαισθησία των κινητών συσκευών είναι -85 dBm. Θέλουμε ο λόγος σήμα-προς-ενδοκαναλική παρεμβολή να είναι τουλάχιστον 16 dB, ενώ επίσης στην ώρα αιχμής ο βαθμός εξυπηρέτησης να είναι 2%. Επίσης ξέρουμε ότι σε κάθε κεραία οποιουδήποτε Σταθμού Βάσης θα έχουμε εσωτερικές απώλειες της τάξης των 2dB. Το κόστος κάθε κεραίας εξαρτάται από τα Watt εκπομπής (300€/Watt).
- Πώς θα σχεδιαστεί το σύστημα έτσι ώστε να ικανοποιούνται όλες οι παραπάνω απαιτήσεις, με το ελάχιστο κόστος? Ποιο θα είναι το κόστος αυτό? (ως κόστος, για απλότητα, θεωρείστε μόνο το κόστος των Σταθμών Βάσης)
- Θεωρούμε κυψέλες ίδιας ακτίνας, με ίδιους Σταθμούς Βάσης (ένας πανκατευθυντικός σε κάθε κυψέλη)

- Το πρώτο που πρέπει να βρει κανείς είναι το μέγεθος της συστάδας (ή, ισοδύναμα, τον παράγοντα επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων). Αυτός υπολογίζεται από τις ενδοκαναλικές παρεμβολές.

- Γνωρίζουμε ότι ισχύει $D/R=\sqrt{3N}=Q$

- όπου D η απόσταση δύο κυψελών που καλύπτουν τις ίδιες συχνότητες (1ης ζώνης, δηλαδή οι δύο κοντινότερες) ή, με άλλα λόγια, η απόσταση επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας, και R η μέγιστη απόσταση που μπορεί να βρεθεί ένας συνδρομητής από τον Σταθμό Βάσης (ακτίνα της κυψέλης).

- Στην ουσία θέλουμε το μικρότερο δυνατό N που να εξασφαλίζει 16 dB co-channel interference
- (Γιατί το μικρότερο δυνατό N? Γιατί, όσο μεγαλύτερο N, τόσο μικρότερη η χωρητικότητα της κάθε κυψέλης)
- Θεωρούμε αρχικά την απλή περίπτωση, όπου όλες οι ομοκαναλικές κυψέλες απέχουν το ίδιο (D) από το χειρότερο σημείο που ο χρήστης μπορεί να βρεθεί (στα όρια της κυψέλης).

Ενδοκαναλική παρεμβολή (συνέχεια)

- Άρα, ο λόγος σήματος-προς-θόρυβο είναι

$$C / I = \frac{\left(\frac{P}{R}\right)^{\gamma}}{6\left(\frac{P}{D}\right)^{\gamma}}$$

όπου P η ισχύς που εκπέμπουν οι Σταθμοί Βάσης και το γ υποδηλώνει την εξάρτηση των λαμβανόμενων ισχύων με την απόσταση

•Θυμηθείτε την ανάλυση του Κεφαλαίου 4: για διάδοση στον ελεύθερο χώρο, έχουμε γ=2, ενώ για ανακλάσεις έχουμε γ=4.

Τελικά, έχουμε

$$C / I = \frac{Q^{\gamma}}{6}$$

Ενδοκαναλική παρεμβολή (συνέχεια)

- Για γ=4:

$$C/I(dB) = 10\log(\frac{Q^4}{6}) = 40\log Q - 10\log 6 =$$
$$= 40\log Q - 7{,}78$$

- Άρα, θέλουμε να ισχύει

$$40\log Q - 7{,}78 \geq 16 \Rightarrow 40\log Q \geq 23{,}78 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \log Q \geq 0{,}5945 \Rightarrow Q \geq 10^{0{,}5945} \approx 3{,}93$$

- Κατά συνέπεια, πρέπει να ισχύει

$$\sqrt{3N} \geq 3{,}93 \Rightarrow 3N \geq 15{,}44 \Rightarrow N \geq 5{,}1467$$

Ενδοκαναλική παρεμβολή (συνέχεια)

- Ποια τιμή του N θα επιλέξουμε λοιπόν?
- Το N είναι ακέραιος αριθμός τέτοιος ώστε να υπάρχουν ακέραιοι i,j με την ιδιότητα $N=i^2 + j^2 + ij$

i	j	i^2+j^2+ij
0	1	1
0	2	4
1	2	7
2	2	12
0	3	9

‘Αρα, ο μικρότερος ακέραιος που ικανοποιεί τη σχέση είναι N=7.

Ενδοκαναλική παρεμβολή (συνέχεια)

- <u>Για καλύτερη ακρίβεια:</u>
- Θα χρησιμοποιήσουμε τη σχέση

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{2(Q-1)^{-\gamma} + 2(Q+1)^{-\gamma} + 2Q^{-\gamma}}$$

(βλέπε Κεφάλαιο 2)

Βρήκαμε N=7, άρα $Q = \sqrt{3N} = \sqrt{21} \approx 4{,}58$

Ο προηγούμενος τύπος δίνει

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{2(3{,}58)^{-4} + 2(5{,}58)^{-4} + 2 \cdot 4{,}58^{-4}} \approx 53{,}76$$

ή 17,3 dB -> Άρα, το N=7 μας εξυπηρετεί, αφού 17,3>16

Ενδοκαναλική παρεμβολή (συνέχεια)

- Μήπως θα μπορούσαμε να εξασφαλίσουμε C/I 16 dB και με μικρότερο N?
- Η αμέσως μικρότερη επιτρεπτή τιμή του N είναι 4. Για N=4, θα έχουμε

$$Q = \sqrt{3N} = \sqrt{12} \approx 3,46$$

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{2(2,46)^{-4} + 2(4,46)^{-4} + 2 \cdot 3,46^{-4}} \approx 27,78$$

ή 14,43 dB -> Άρα, το N=4 δεν μας εξυπηρετεί, οπότε <u>καταλήξαμε N=7</u>

- Αφού βρήκαμε N=7, ξέρουμε πλέον πόσα κανάλια συχνοτήτων θα εξυπηρετεί η κάθε κυψέλη. Θα είναι 124/7 ≅ 17,71, οπότε 17 κανάλια/κυψέλη (6 κυψέλες θα έχουν 17 κανάλια και μία θα έχει 22, αφού 6 x 17 + 22 = 124).
- Αφού ξέρουμε πόσα κανάλια έχει κάθε κυψέλη, καθώς και το GOS που θέλουμε, μπορούμε να βρούμε την κίνηση που μπορεί να εξυπηρετήσει η κυψέλη από τους πίνακες Erlang. Για 17 κανάλια λοιπόν και GOS=2%, βρίσκουμε A=10,66 E
- Πλέον, μπορούμε να βρούμε πόσους χρήστες μπορεί να έχει η κάθε κυψέλη. Εάν M είναι οι χρήστες σε μία κυψέλη, θα έχουμε

$$10{,}66 = \frac{0{,}7 * M * 150}{3600} \Rightarrow M \approx 365{,}48$$

- Δηλαδή, η κυψέλη πρέπει να είναι τέτοιων διαστάσεων ώστε να βρίσκονται μέσα σε αυτή 365 συνδρομητές.

- Αφού 60000 συνδρομητές υπάρχουν σε 20000 km^2, τότε 365 συνδρομητές υπάρχουν σε $20000 \cdot (365/60000) \approx 121{,}6\ km^2$.
- Άρα, η ακτίνα της κυψέλης θα βρεθεί από τη σχέση $2{,}598R^2 = 121{,}6$ οπότε

  $R \approx 6{,}84$ km.

  ($2{,}598R^2$ είναι η σχέση που δίνει το εμβαδό της εξαγωνικής κυψέλης, συναρτήσει της ακτίνας R)

- Η ακτίνα λοιπόν δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από 6,84km, γιατί τότε δεν θα μπορεί το δίκτυό μας να εγγυηθεί GOS 2% για την ώρα αιχμής. Ενδεχομένως όμως η ακτίνα να πρέπει να μειωθεί και άλλο, λόγω των απωλειών μετάδοσης. Αυτό θα εξεταστεί αμέσως τώρα.

- Έστω P (dBm) η ισχύς εκπομπής του Σταθμού Βάσης.
- Οι απώλειες σε απόσταση 20,5 km θα υπολογιστούν από τη σχέση του Okumura-Hata. Για λόγους απλότητας, θα πάρουμε την τυπική σχέση

$$L=126,42+35,22\log(r)$$

που αντιστοιχεί στην περίπτωση ύψους κεραίας 30m και ύψος κινητής μονάδας 1,5m. Άρα, οι απώλειες θα είναι

$$126,42 + 35,22\log(6,84)=155,83\text{dB}.$$

- Άρα, αν P dBm είναι η ελάχιστη δυνατή ισχύς που πρέπει να εκπέμπει ένας Σταθμός Βάσης για να γίνει το σήμα του καταληπτό από κάθε κινητό στην κυψέλη του, τότε θα ισχύει
- P-2-155,83=-85 => P=72,83 dBm.
- Με άλλα λόγια, κάθε σταθμός θα εκπέμπει $10^{7,283}$mWatt = $10^{4,283}$ Watt (νούμερο αστρονομικά μεγάλο και εκτός πραγματικότητας).
- Κατά συνέπεια, <u>η ακτίνα της κυψέλης θα καθοριστεί από τις απώλειες καθαρά και όχι από την κίνηση</u> (θα είναι δηλαδή σημαντικά μικρότερη από 6,84 km).

- (Παρατήρηση: αν η ισχύς που βρίσκαμε παραπάνω ήταν λογική (π.χ. 30 Watt), τότε θα βρίσκαμε πόσες κυψέλες θα έχει η περιοχή των 20000 km^2 που μελετάμε και θα πολλαπλασιάζαμε το πλήθος τους με το 9000 €, που είναι το κόστος μίας κεραίας 30Watt, για να βρούμε το συνολικό κόστος).

- Έστω ότι αποφασίζουμε P=30Watt (44,7dBm).
- Τότε οι μέγιστες επιτρεπτές απώλειες L θα πρέπει να ικανοποιούν τη σχέση
- 44,7-2-L=-85 => L = 127,7 dB.
- Η ακτίνα της κυψέλης, για αυτές τις απώλειες, θα δοθεί από τον τύπο του Okumura-Hata:

  127,7=126,42+35,22log(R) => log(R)=0,036 => R=1,08

  δηλαδή R=1km.
- Κατά συνέπεια, το εμβαδό της κυψέλης θα ισούται με 2,598R^2 = 2,598 km^2. Άρα, συνολικά θα έχουμε 20000/2,2598 κυψέλες ≈ 8850,34, δηλαδή 8851 κυψέλες.
- Συνεπώς, το κόστος του συστήματος θα είναι 8851 x 30 x 300 = 79.659.000 €.

- Είναι αυτό το κόστος το μικρότερο δυνατό?
- Όχι απαραίτητα (άλλωστε, τα 30Watt τέθηκαν αυθαίρετα). Αν μειώσουμε την ακτίνα της κυψέλης (οπότε αντίστοιχα μειωθεί η εκπεμπόμενη ισχύς κάθε Σταθμού Βάσης), τότε ενδεχομένως να μειώσουμε το συνολικό κόστος. Βέβαια, μειώνοντας την ακτίνα των κυψελών αυξάνεται το πλήθος των κυψελών, οπότε δεν είναι καθόλου προφανές το τι τελικά θα συμβεί με το συνολικό κόστος.
- Αντίστοιχα, ίσως η βέλτιστη λύση να είναι για περισσότερα από 30 Watt, αφού τότε μεγαλώνει η ακτίνα της κυψέλης και άρα μειώνεται ο αριθμός των κυψελών (άρα και των Σταθμών Βάσης). Ωστόσο, πάλι δεν είναι προφανές (πρέπει η μείωση των κυψελών να είναι σημαντική).
- Τελικά, αυτό που κάνουμε είναι έλεγχος για όλες τις πιθανές τιμές του P
- <u>Άσκηση</u>: Φτιάξτε πρόγραμμα σε υπολογιστή το οποίο να υπολογίζει την καλύτερη περίπτωση για το παράδειγμά μας (να γίνει έλεγχος για τις τιμές 20, 21, …, 50 Watt).

Ένα τελευταίο σχόλιο

- Η κάθε κυψέλη έχει τελικά περισσότερα κανάλια από ό,τι τελικά χρειάζεται – μπορεί να εξυπηρετήσει κίνηση 10,66 Ε τα οποία δεν θα της ζητηθούν ποτέ. Οι χρήστες που έχει η κάθε κυψέλη ακτίνας R=1km είναι μόλις 2,598 · 60000/20000 ≈ 8. Άρα, η κίνηση που θα ζητηθεί από την κυψέλη σε ώρα αιχμής είναι μόλις
$$\frac{0,7*8*150}{3600} = 0,23\,\mathrm{E}$$
- Αν δούμε τον πίνακα Erlang (επόμενη διαφάνεια), θα δούμε ότι και 3 κανάλια να είχε η κυψέλη επαρκούν! (ενώ δύο κανάλια όχι). Άρα, μπορούμε να μεγαλώσουμε το μέγεθος της συστάδας N, έτσι ώστε να μειώσουμε ακόμη περισσότερο τις ενδοκαναλικές παρεμβολές αλλά (το βασικότερο) να μειώσουμε το πραγματικό κόστος του δικτύου (αφού το κόστος της κεραίας εξαρτάται στην πράξη και από τις συχνότητες που καλύπτει).
- (Σημειώστε ότι τα παραπάνω νούμερα εξυπηρετούν μόνο για διδακτικούς λόγους και δεν είναι ρεαλιστικά – κυψέλη με 8 μόνο χρήστες σε περιβάλλον πόλης δεν μπορεί να υπάρξει)

Πίνακας Erlang B

C	Προσφερόμενη κίνηση A (erlang)											
	Πιθανότητα αποκλεισμού B (%)											
	0.01	0.05	0.1	0.5	1	2	5	10	15	20	30	40
1	.0001	.0005	.0010	.0050	.0101	.0204	.0526	.1111	.1765	.2500	.4286	.6667
2	.0142	.0321	.0458	.1054	.1526	.2235	.3813	.5954	.7962	1.000	1.449	2.000
3	.0868	.1517	.1938	.3490	.4555	.6022	.8994	1.271	1.603	1.930	2.633	3.480
4	.2347	.3624	.4393	.7012	.8694	1.092	1.525	2.045	2.501	2.945	3.891	5.021
5	.4520	.6486	.7621	1.132	1.361	1.657	2.219	2.881	3.454	4.010	5.189	6.596
6	.7282	.9957	1.146	1.622	1.909	2.276	2.960	3.758	4.445	5.109	6.514	8.191
7	1.054	1.392	1.579	2.158	2.501	2.935	3.738	4.666	5.461	6.230	7.856	9.800
8	1.422	1.830	2.051	2.730	3.128	3.627	4.543	5.597	6.498	7.369	9.213	11.42
9	1.826	2.302	2.558	3.333	3.783	4.345	5.370	6.546	7.551	8.522	10.58	13.05
10	2.260	2.803	3.092	3.961	4.461	5.084	6.216	7.511	8.616	9.685	11.95	14.68
11	2.722	3.329	3.651	4.610	5.160	5.842	7.076	8.487	9.691	10.86	13.33	16.31
12	3.207	3.878	4.231	5.279	5.876	6.615	7.950	9.474	10.78	12.04	14.72	17.95
13	3.713	4.447	4.831	5.964	6.607	7.402	8.835	10.47	11.87	13.22	16.11	19.60
14	4.239	5.032	5.446	6.663	7.352	8.200	9.730	11.47	12.97	14.41	17.50	21.24
15	4.781	5.634	6.077	7.376	8.108	9.010	10.63	12.48	14.07	15.61	18.90	22.89
16	5.339	6.250	6.722	8.100	8.875	9.828	11.54	13.50	15.18	16.81	20.30	24.54
17	5.911	6.878	7.378	8.834	9.652	10.66	12.46	14.52	16.29	18.01	21.70	26.19
18	6.496	7.519	8.046	9.578	10.44	11.49	13.39	15.55	17.41	19.22	23.10	27.84
19	7.093	8.170	8.724	10.33	11.23	12.33	14.32	16.58	18.53	20.42	24.51	29.50
20	7.701	8.831	9.412	11.09	12.03	13.18	15.25	17.61	19.65	21.64	25.92	31.15
21	8.319	9.501	10.11	11.86	12.84	14.04	16.19	18.65	20.77	22.85	27.33	32.81
22	8.946	10.18	10.81	12.64	13.65	14.90	17.13	19.69	21.90	24.06	28.74	34.46
23	9.583	10.87	11.52	13.42	14.47	15.76	18.08	20.74	23.03	25.28	30.15	36.12

- Για 3 κανάλια ανά κυψέλη, θα θέλουμε N=124/3=41,3333, δηλαδή N=39 (για i=5, j=2, ενώ δεν μπορεί να υπάρξει N=40 ή 41 για καμία επιλογή των i,j).
  - Με N<41,33, εξασφαλίζουμε ότι δεν θα υπάρξουν μόνο δύο κανάλια σε καμία κυψέλη

- Γίνεται σαφές λοιπόν, από όλη την προηγούμενη ανάλυση, πόσοι παράγοντες υπεισέρχονται για τον προσδιορισμό των σχεδιαστικών παραμέτρων του δικτύου (όπου αξίζει να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο παράδειγμα είναι εξαιρετικά απλοποιημένο σε σχέση με τις ρεαλιστικές εφαρμογές). Η οργάνωση του δικτύου λοιπόν είναι μία σύνθετη διαδικασία, που αποσκοπεί στο να συγκεράσει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο όλες τις απαιτήσεις και τους περιορισμούς.