

## Opracowanie wyników propagacji w podziemnych wyrobiskach górnictw w Kopalni Węgla Kamiennego Ziemowit i porównanie ich z danymi literaturowymi

### Zespół realizujący pomiary:

**Dr inż. Cezary Worek** (adiunkt, kierownik pracowni bezprzewodowych sieci kontrolno-pomiarowych, Katedra Elektroniki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie)

**Mgr inż. Michał Warzecha** (asystent, Katedra Elektroniki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie)

**Joanna Kożuch** (Katedra Elektroniki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, prace edytorskie)

### Skalowanie poligonu pomiarowego

W celu wyznaczenia współczynnika antenowego sondy przeprowadzono pomiary propagacyjne w otwartej przestrzeni (boisko sportowe) z wykorzystaniem dwóch anten logarytmicznych (skalowanie anteny wzorcowej), generatora szumu i analizatora widma.

Doświadczalnie wyznaczono współczynnik zysku  $G$  anteny logarytmicznej umieszczonej poprzez obserwacje tłumienia toru pomiarowego (propagacja, kable transmisyjne).

Wszystkie obliczenia oparto na równaniu bilansu toru transmisyjnego, w którym wyróżniono: moc źródła sygnału ( $P_{nad}$ ) oraz mocy sygnału odbieranego ( $P_{odb}$ ), tłumienie kabli ( $T_{k1}$ ,  $T_{k2}$ ), tłumienie przestrzeni<sup>1</sup> ( $T_{rp}$ ) i współczynnik zysku anteny ( $G$ ).

$$P_{odb[dB]} = P_{nad[dB]} + T_{k1[dB]} + T_{k2[dB]} + 2G_{[dB]} + T_{rp[dB]} \quad (1)$$

Wielkości  $P_{nad}$ ,  $P_{odb}$ ,  $T_{k1}$ ,  $T_{k2}$  określono przy użyciu analizatora widma z generatorem śledzącym, natomiast tłumienie przestrzeni z zależności geometrycznej:

$$T_{rp[dB]} = 10 \log \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 = 20 \log \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right) \quad (2)$$

gdzie  $R$  odległość między anteną nadawczą a anteną odbiorczą;  $\lambda$  - długość fali (w przypadku pomiarów analizatorem widma wyznaczono zbiór współczynników dla przemiatanego zakresu częstotliwości).

Wykonane pomiary pozwoliły wyznaczyć widmową zależność wzmocnienia  $G$  anteny logarytmicznej umieszczonej na badanym poligonie obserwowanej z punktu umieszczenia drugiej anteny (ze względu na modyfikujące działanie płaszczyzny ziemi). Otrzymane wyniki pozwoliły w dalszej części potraktować antenę logarytmiczną jako wzorcową.

<sup>1</sup> Tłumienie przestrzeni – jest to współczynnik występujący w równaniach toru transmisyjnego (bilans mocy) w których obydwie anteny mamy scharakteryzowane poprzez zysk energetyczny ( $G$ ). Podstawowe równanie zawiera zysk energetyczny anteny nadawczej – dla uzyskania powierzchniowej gęstości mocy w punkcie gdzie stoi antena odbiorcza, natomiast antenę odbiorczą charakteryzuje się jako jej powierzchnię efektywną (przemnożona przez moc powierzchniową daje moc odebraną). Przeliczenie powierzchni efektywnej anteny odbiorczej z jej zysku posiada czynnik  $\lambda^2/4\pi$  który „sumuje” się z rozpraszaniem przestrzennym  $1/4\pi R^2$  do tzw. współczynnika tłumienia przestrzeni.

## Skalowanie sondy na poligonie pomiarowym

W miejsce drugiej anteny wstawiono badaną sondę HZ530 a więc w misce gdzie powierzchniowa gęstość mocy promieniowanej wynosiła:

$$\Pi_{r[dB]} = P_{nad[dB]} + T_{k1[dB]} + G_{[dB]} - 10 \log(4\pi R^2) \quad (3)$$

W (3) pojawia się tylko zależność od odległości R, ponieważ długość fali będąca składnikiem współczynnika tłumienia przestrzeni w (1) wchodzi w skład apertury badanej sondy.

Na tej podstawie wyznaczono współczynnik antenowy (jego widmową zależność)

Sonda umieszczona w odległości R od anteny nadawczej jest umieszczona w obszarze promieniowania o gęstości mocy padającej, (3) co w odniesieniu do impedancji falowej powietrza daje natężenie pola elektrycznego równe:

$$\Pi_r = \frac{E_r^2}{Z_f} \quad (4)$$

$$10 \log \Pi_r = 10 \log \frac{E_r^2}{Z_f} = 20 \log E_r - 10 \log Z_f$$

$$Z_f = 120\pi \quad [\Omega]$$

czyli:

$$20 \log E_r = 10 \log \Pi_r + 10 \log Z_f \quad (5)$$

Na wyjściu sondy zmierzono analizatorem moc  $P_{odb}$ , która jest pomniejszona o tłumienie kabla łączącego sondę i analizator o tłumienności  $T_{k2}$ .

$$P_{s[dB]} = P_{odb[dB]} - T_{k2[dB]} \quad (6)$$

W podobny sposób jak wyznaczono natężenie pola elektrycznego w miejscu ustawienia sondy, możemy wyznaczyć napięcie na zaciskach sondy na podstawie mocy odebranej i impedancji falowej kabla. Napięcie to wynosi:

$$20 \log U_r = 10 \log P_s + 10 \log Z_0 \quad (7)$$

$$Z_0 = 50 \quad [\Omega]$$

Szukany współczynnik antenowy wynosi:

$$WA = \frac{E_r}{U_r} \quad (8)$$

czyli w skali decybelowej:

$$WA_{[dB]} = 20 \log E_r - 20 \log U_r \quad (9)$$

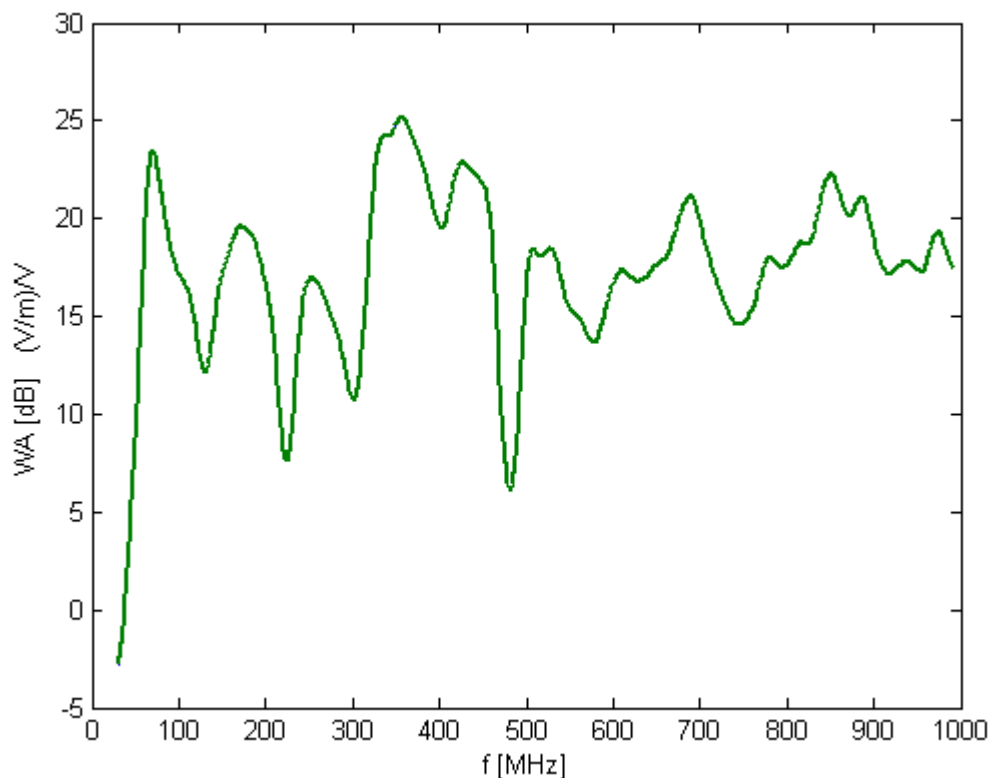
$$WA_{[dB]} = 10 \log \Pi_r + 10 \log Z_f - 10 \log P_s - 10 \log Z_0 \quad (10)$$

i podstawiając (3) i (6) otrzymujemy:

$$WA_{[dB]} = P_{nad[dB]} + T_{k1[dB]} + G_{[dB]} - 10 \log(4\pi R^2) + 10 \log Z_f - P_{odb[dB]} + T_{k2[dB]} - 10 \log Z_0 \quad (11)$$

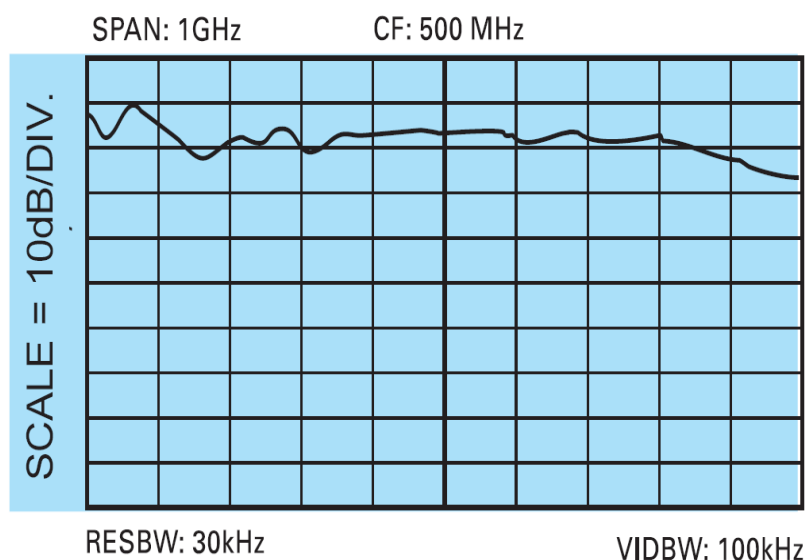
Końcowa zależność pozwala nam na obliczenie współczynnika antenowego sondy w oparciu o wyniki danych pomiarowych. Przyjęto notację decybelową dla zwiększenia przejrzystości oraz ze względu na taką postać danych pomiarowych.

Wyznaczony w powyższy sposób współczynnik antenowy WA został przedstawiony na rys.1.



Rys. 1. Współczynnik antenowy sondy HZ530 wyznaczony metodą anteny wzorcowej.

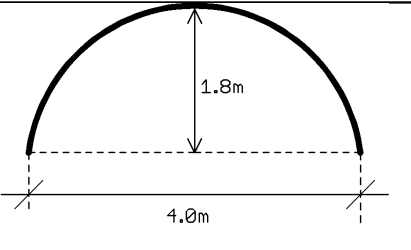
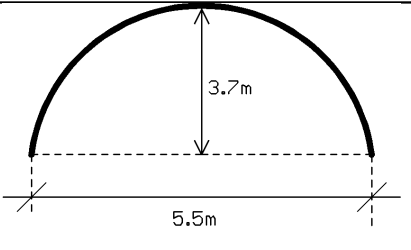
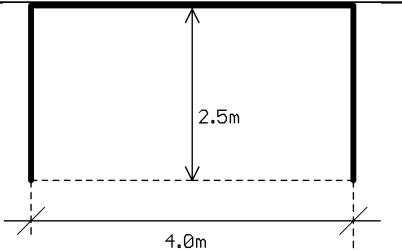
Dla odniesienia można przytoczyć dane z noty katalogowej producenta, który zdradza jedynie rząd wielkości nierównomierności widmowej współczynnika antenowego sondy – rys.2.

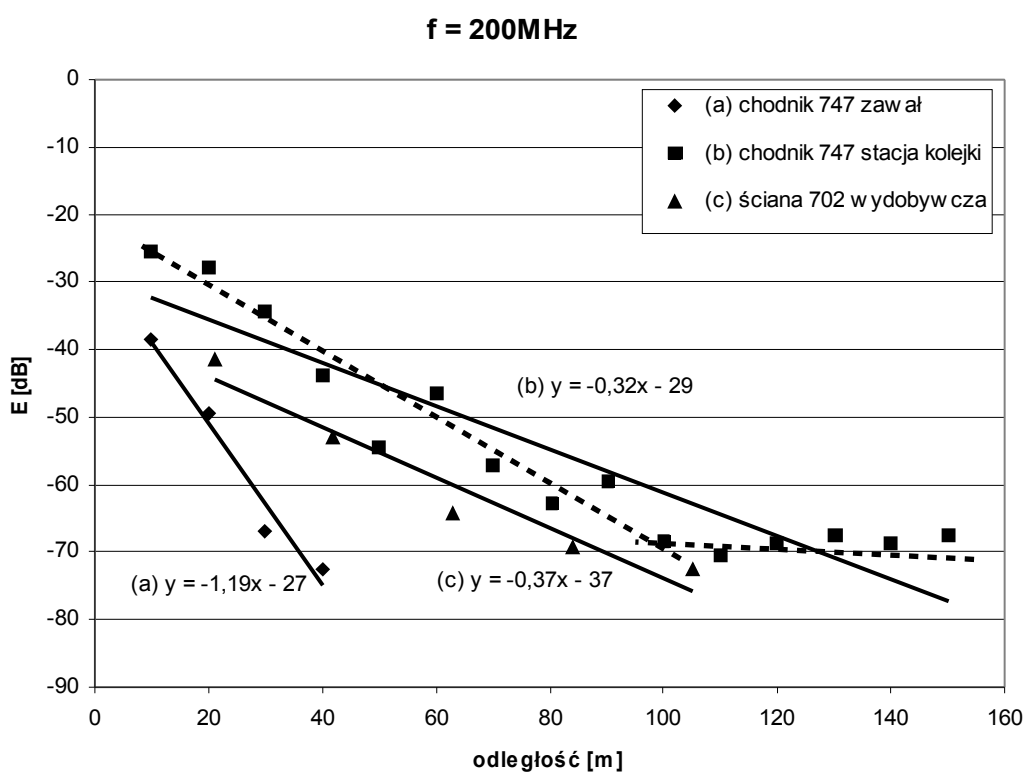


Rys. 2. Współczynnik antenowy sondy HZ530 – dane producenta (na osi pionowej moc sygnału a na poziomej częstotliwość)

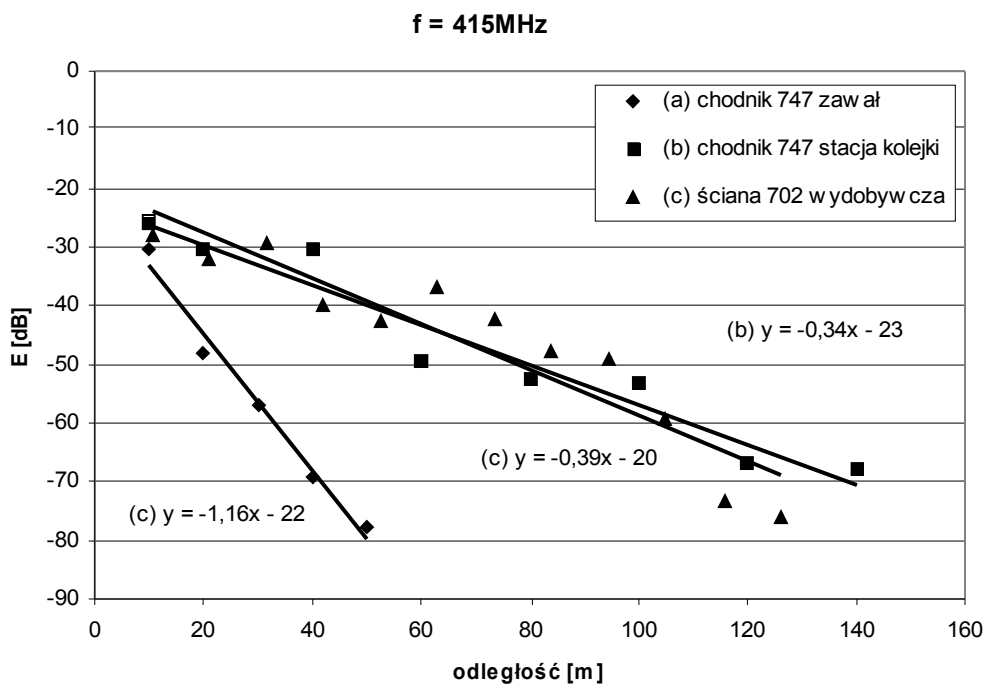
Podsumowując przeprowadzone pomiary propagacji zaprezentowano wyniki przekształcone do postaci natężenia pola elektrycznego na rysunkach od 3 do 5 zaś w formie liczbowej w tabeli 2. Do tego celu wykorzystano wyznaczony wcześniej współczynnik antenowy sondy pomiarowej (rys.1). Wartość współczynnika została wyznaczona metodą anteny wzorcowej [1]. Przekroje poprzeczne korytarzy, w których zostały zrealizowane pomiary propagacyjne zostały przedstawione w tabeli 1.

Tab. 1. Z przekrojami poprzecznymi korytarzy podziemnych w kopalni Ziemowit, w których zrealizowano pomiary

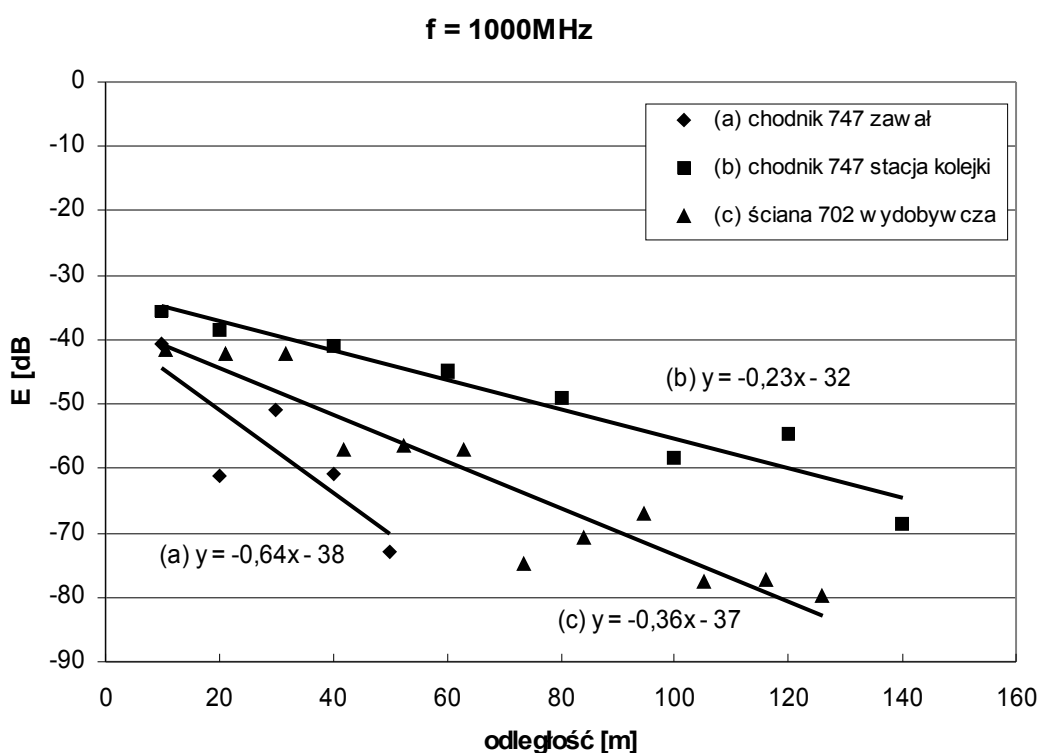
		
<p>(a) Przekrój chodnika przyścianowego nr 747- zawał około 100m poniżej ściany 702 w partii wybranej w zawał</p>	<p>(b) Przekrój chodnika 747 na stacji kolejki podwieszanej Sharf</p>	<p>(c) Przekrój poprzeczny wyrobiska ścianowego 702 - prostokątny i miał wysokość 2.5m i szerokość 4.0m</p>



Rys. 3. Natężenie pola elektrycznego zmierzone w różnych odległościach od nadajnika w korytarzach podziemnych kopalni Ziemowit – tłumienie trasy dla częstotliwości 200MHz w trzech różnych tunelach podziemnych.



Rys. 4. Natężenie pola elektrycznego zmierzone w różnych odległościach od nadajnika w korytarzach podziemnych kopalni Ziemowit – tłumienie trasy dla częstotliwości 415MHz w trzech różnych tunelach podziemnych.



Rys. 5. Natężenie pola elektrycznego zmierzone w różnych odległościach od nadajnika w korytarzach podziemnych kopalni Ziemowit – tłumienie trasy dla częstotliwości 1000MHz w trzech różnych tunelach podziemnych.

Tab. 2. Wyniki pomiarów tłumienia trasy na podstawie [2, Tabela 2-3] gdzie stopa oznacza 0.3048m

FREQUENCY	POLARIZATION		
	VERTICAL	*CROSS	HORIZONTAL
200 MHz	≈ 25dB/100 ft	15dB/100 ft	---
415 MHz	6dB/100 ft	6dB/100 ft	6dB/100 ft
1000 MHz	4dB/100 ft	3dB/100 ft	2.5dB/100 ft

\*Vertical transmit, horizontal receive.

Tab. 3. Wyniki pomiarów tłumienia trasy na podstawie pomiarów w różnych tunelach w kopalni Ziemowit

Częstotliwość	Chodnik 747 - zawal	Chodnik 747 - stacja kolejki podwieszanej	Ściana 702 - wydobywca
200MHz	117	37	32
415MHz	116	39	34
1000MHz	64	28	36

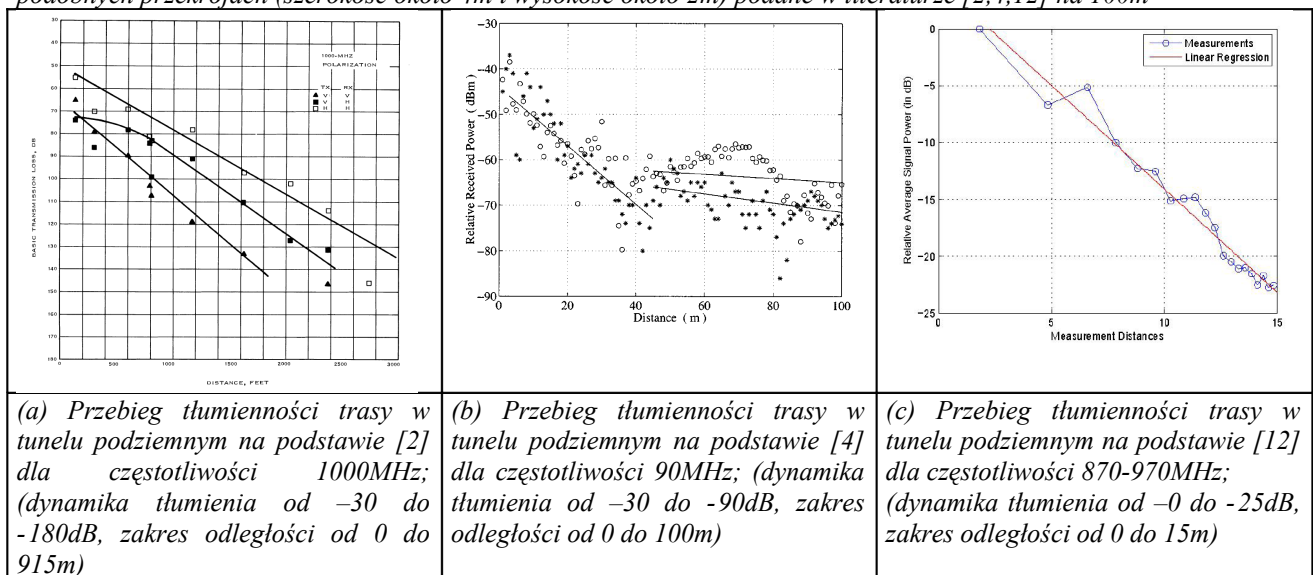
Tab. 4. Porównania wyników pomiarów tłumienia trasy tuneli na 100m o podobnych przekrojach (4-6m szerokości i 2.5-3m wysokości) podane w literaturze [2,4,7,12] oraz zmierzonych w kopalni Ziemowit

Częstotliwość	Chodnik/tunel [2]	Inna literatura [4,7,12]	Ściana 702 - wydobywca
200MHz	80-50	50	32
415MHz	20	20-36	34
1000MHz	10-13	30-45-180	36

Powyższe częstotliwości zostały wybrane dla porównania wyników z pracami innych autorów. Przykładowo w raporcie firmy *Collins Radio Company* [2] (Tab.2) badano propagację w tunelu o przekroju prostokątnym będący drogą transportową, który miał szerokość około 4.3m (14 feet) i wysokość około 2.1-2.3m (7-8 feet) i był on zbliżony wymiarami do badanego w kopalni Ziemowit (szerokość 4m i wysokość 2.5m) dla przypadku „c”. W raporcie [2,7] dla częstotliwości 200MHz oszacowano tłumienie trasy na 50-80dB/100m (w zależności od polaryzacji – prostokątny przekrój tunelu). Prezentowane wyniki z kopalni Ziemowit wskazują na tłumienie na poziomie 37dB/100m przy tej samej częstotliwości. Ze względu na dużą liczbę czynników, które mają wpływ na całościowe tłumienie trasy w tunelu ziemnym oraz trudności pomiarowe i spowodowane nimi duże niepewności pomiarowe, można uznać, że wyniki te są ze sobą zbieżne.

W przypadku częstotliwości 415MHz i 1000MHz tłumienie trasy zmierzone w tunelu (c) w kopalni Ziemowit oscyluje w granicach 36-39dB/100m, podczas gdy dane podawane przez [2] mają wartości 10-20dB/100m zaś w literaturze [4,7,12] wahają się od wartości 30dB do 180dB/100m. Ta bardzo duża rozbieżność poza wspomnianą niepewnością pomiarową wynika także z zastosowanych mocy nadajników i wynikających z nich zasięgów badanych transmisji. W [2] stosowano wielokrotnie większe moce nadajnika, przez co obserwowano sygnał na większych odległościach. W transmisji w tunelu podziemnym obserwuje się dwa zakresy o różnym współczynniku tłumienia. Pierwszy blisko anteny – wielomodowy (mody falowodowe wysokiego i niskiego rzędu) charakteryzujący się silnym tłumieniem, oraz drugi zawierający mody falowodowe niższego rzędu charakteryzujący się mniejszym tłumieniem. Zwiększenie mocy nadajnika i wydłużenie zasięgu transmisji spowodowało, że w [2] obserwowano średnio mniejsze tłumienie trasy, ponieważ większy wkład w średnią miały drugi zakres o mniejszym tłumieniu. Opisany efekt widoczny jest na rysunku 3 wykres (b) i w tabeli 5 (b).

Tab. 5. Porównania wyników pomiarów tłumienia trasy dla częstotliwości 900-1000MHz, dla tuneli podziemnych o podobnych przekrojach (szerokość około 4m i wysokość około 2m) podane w literaturze [2,4,12] na 100m



Podsumowując uzyskane wyniki i towarzyszące im rozbieżności w porównaniu z niektórymi danymi literaturowymi, należy pokreślić, że badania prowadzone przez nasz zespół odbywały się w zakresach mocy normalnie stosowanych w systemach radiowych, przez co są bardziej odpowiednie do wyciągania wniosków na temat zasięgu propagacji generowanych sygnałów (gęstość mocy generatora szumu 0dBm/1MHz). Duże zasięgi transmisji dodatkowo wymagają prostych odcinków tuneli, w których może odbywać się formowanie modów falowodowych o niskim tłumieniu (duży zasięg), co dodatkowo ogranicza w praktyce występowanie takiego przypadku.

Charakterystyka infrastruktury podziemnych zakładów górniczych (głębokość pod ziemią, przekroje tuneli, nieregularność kształtu, dodatkowe wyposażenie/zbrojenie ścian tuneli) sprawiają, że fale elektromagnetyczne emitowane przez urządzenia transmisyjne o ograniczonej mocy do 20-26dBm ERP, stosowane na terenie kopalni nie są w stanie wydostać się na powierzchnię na poza poziom wymagany dla regulacji prawnych (np. dla normy PN-EN 55022:2000 dla urządzeń klasy B oraz w ETSI EN 301 489-1:2004).

## Literatura:

1. P.Tyrawa, M.Kałuski, Procedury wzorcowania anten pomiarowych, Telekomunikacja i Techniki Komunikacyjne, 1-2,2005
2. Collins Radio Company, "Research and Development Contract for Coal Mine Communication System", Prepared for Department of Interior Bureau of Mines Washington, D. C. USBM Contract No. H023205615, November 1974
3. A. G. Emslie, R. Lagace, P. F. Strong, "Theory of the Propagation of UHF Radio Waves in Coal Mine Tunnels", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. ap-23, no. 2, March 1975
4. Y. P. Zhang, G. X. Zheng, and J. H. Sheng, "Radio Propagation at 900 MHz in Underground Coal Mines", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 49, no. 5, May 2001
5. Y. P. Zhang, Y. Hwang, J. H. Sheng, "Propagation Characteristics of UHF Simulcast Signals in Tunnel Environments", Communication Technology Proceedings, 1996. ICCTapos;96., 1996 International Conference on Volume , Issue , 5-7 May 1996 Page(s):457 - 460 vol.1
6. Y. P. Zhang and H. J. Hong, "Ray-Optical Modeling of Simulcast Radio Propagation Channels in Tunnels", IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 53, NO. 6, NOVEMBER 2004
7. Dana T. Updyke, Wayne C. Muhler, Howard C. Turnage, "AN EVALUATION OF LEAKY FEEDER COMMUNICATION IN UNDERGROUND MINES", United States Department of the Interior Bureau of Mines Contract No.: JO 199048, June 1980
8. Fernando Martí Pallarés, Francisco J. Ponce Juan, Leandro Juan-Lláce, "Analysis of Path Loss and Delay

- Spread at 900 MHz and 2.1 GHz While Entering Tunnels”, *IEEE IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY*, VOL. 50, NO. 3, MAY 2001 767
9. T.S. Cory, “Propagation of EM Signals in Underground Metalinon-Metal Mines“, U.S. Department of the Interior Bureau of Mines 4800 Forbes Avenue Pittsburgh, Pennsylvania 15213
  10. Martine Liénard and Pierre Degauque, “Natural Wave Propagation in Mine Environments”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 48, no. 9, September 2000
  11. S. Chow, “Propagation of Radio Waves in Potash Mine Tunnels and its Implication on Radio Systems Performance”, Communications Research Centre (CRC) Department of Communications (DOC), Government of Canada, Singapore ICCS/ISITA '92
  12. Y. Serhan, H. Arslan, “Statistical Wireless Channel Propagation Characteristics in Underground Mines at 900MHz”, Military Communications Conference, 2007, MILCOM 2007. IEEE, p.1-7, 29-31 Oct. 2007